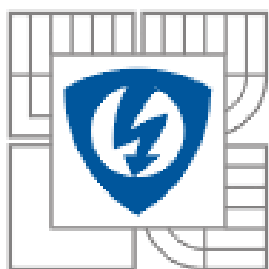


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

ŘÍZENÍ VIBRAČNÍ STOLICE POMOCÍ EMBEDDED SYSTÉMU

VIBRATION SYSTEM CONTROL THROUGH EMBEDDED SYSTEM

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

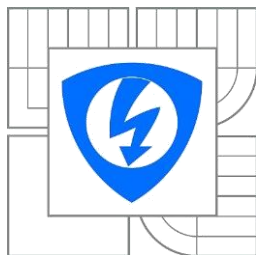
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. DÁVID GENČANSKÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2014



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav mikroelektroniky

Student: Bc. Dávid Genčanský
Ročník: 2

ID: 151301
Akademický rok: 2013/2014

NÁZEV TÉMATU:

Řízení vibrační stolice pomocí embedded systému

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Zpracujte základní teorii pro řízení vibračních systémů. Vytvořte řídicí a záznamový program v prostředí Labview na platformě CompactRIO. Řízení realizujte pomocí zpětné vazby a pro sběr dat využijte piezoelektrické akcelerometry. Funkčnost programu ověřte na malé vibrační stolici.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 10.2.2014

Termín odevzdání: 29.5.2014

Vedoucí práce: doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

Konzultanti diplomové práce:

Prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Význam vibrácií a vibračných testov je stále aktuálnejší vzhľadom k tomu, že neustále rastie počet mobilných elektronických zariadení. Táto práca sa zaoberá návrhom riadenia vibračného valca, ktorý je základným článkom pre testovanie vibrácií. V úvode je ukázaný prvotný pohľad na problematiku vibrácií, vibračných skúšok, vplyvu vibrácií na súčiastky, spoje a časti používané v mikroelektronike. Popísané sú princípy merania a riadenia vibračných systémov v praxi a je navrhnuté pracovisko pre testovanie a meranie vibrácií, vytvorené. Realizácia bola vytvorená v prostredí LabVIEW na platforme CompactRIO, ktorá zastrešuje pracovisko po stránke hardvéru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vibrácie, vibračné skúšky, riadenie, labview, vibračná stolica

ABSTRACT

The importance of vibration and vibration tests is increasingly relevant given the growing number of mobile electronic devices. This thesis describes the design of control vibrating shaker table, which is an essential element for vibration testing. At the beginning is an initial look on the problematics of vibration, vibration test and influences of vibrations on electronic components, solder joints and other parts uses in microelectronics. Provides insight to the principles of vibration measurement and controlling system used in industry. The workplace is designed for testing and measuring of vibrations. The workplace designed and developed in the LabVIEW environment based on CompactRIO platform.

KEYWORDS

Vibrations, vibrations test, control, labview, shaker table

Genčanský, D. *Řízení vibrační stoličky pomocí embedded systému*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií. Ústav mikroelektroniky, 2014. 75 s., 1 s. příloh. Diplomová práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma *Řízení vibrační stolice pomocí embedded systému* jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne 29. května 2014

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuchovi, CSc., za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc. Další cenné rady při zpracování mé diplomové práce mi poskytl Ing. Alexandr Otáhal.

Experimentální část této diplomové práce byla realizována na výzkumné infrastruktuře vybudované v rámci projektu CZ.1.05/2.1.00/03.0072 Centrum senzorických, informačních a komunikačních systémů (SIX) operačního programu Výzkum a vývoj pro inovace.

V Brně dne 29. května 2014

.....

(podpis autora)

OBSAH

Obsah	7
Zoznam obrázkov	9
Zoznam tabuliek	x
Úvod	1
1. Vibrácie	2
1.1 Vplyv vibrácií na DPS a spájkované spoje.....	3
1.2 Meranie vibrácií.....	6
1.3 Akcelerometre	8
1.3.1 Piezoelektrické akcelerometre	8
1.3.2 Piezorezistívne akcelerometre	9
1.4 Zariadenia na testovanie vibrácií	10
1.5 Prečo potrebujeme vibrácie riadiť	12
2. Regulácia vibrácií	13
2.1 Techniky regulácie vibrácií	14
2.1.1 Feedback	14
2.1.2 Feedforward.....	15
2.1.3 Metóda najmenších štvorcov – LMS	17
2.1.4 PID regulátory	19
3. Testy pre vibračné skúšky	21
3.1.1 Test – náhodné vibrácie	22
3.1.2 Test – rozmetaný sínus	23
3.1.3 Test – šok.....	25
4. PRaktická časť	27
4.1 Návrh riadenia	27
4.1.1 PID regulátor v LabVIEW	27
4.1.2 Popis PID Regulátora	27
4.1.3 Hlavný program.....	29
4.1.4 Výpočet regulačnej odchýlky	32

4.1.5	PWM regulácia pre okruh chladenia	33
4.1.6	Koncept riadenia pre malý vibračný valec	34
4.2	Požiadavky na program	36
4.3	Návrh programu.....	38
4.3.1	FPGA.vi.....	38
	<u>Main (RT).vi</u>	39
	<u>Komunikácia medzi RT a FPGA</u>	42
	<u>Processing.vi</u>	42
4.3.2	Main (Host-PC).vi – predný panel	49
4.3.3	Main (host-pc).vi – blokový diagram	52
4.3.4	Spracovanie údajov.....	55
4.3.5	Manuál pre obsluhu	57
	Záver	59
	Literatúra	60
	Zoznam symbolov, veličín a skratiek	63
	Zoznam príloh	64

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 1: Vibrácie – mechanické kmity	2
Obrázok 2: Prasklina BGA puzdra spôsobená vibráciami [6]	4
Obrázok 3: Prelomený spoj [27]	5
Obrázok 4: Vzájomné vzťahy	7
Obrázok 5: Piezoelektrický akcelerometer	9
Obrázok 6 Elektrodynamický budič [13].....	11
Obrázok 7: PSD vibračného stola bez kompenzácie [14].....	12
Obrázok 8: Vibration control system.....	13
Obrázok 9: Feedback princíp	14
Obrázok 10: Princíp Feedforward.....	16
Obrázok 11: Model adaptívneho FIR filtra.....	17
Obrázok 12: Typický PSD profil vibračného testu [26]	22
Obrázok 13: Vstupný profil pre sínusový test [27].....	24
Obrázok 14: Odpoveď na sínusový test z dvoch kanálov [27].....	25
Obrázok 15: Zariadenie pre šokový test [zdroj:www.fabreka.com].....	26
Obrázok 16: Predný panel.....	28
Obrázok 17: Hlavný program – PID.....	30
Obrázok 18: Architektúra – posledná verzia	31
Obrázok 19: Regulačný algoritmus – PID	32
Obrázok 20: PWM regulácia	33
Obrázok 21: Princíp riadenia	34
Obrázok 22: Dĺžka cyklu pri meraní, spracovaní a úprave.....	35
Obrázok 23: Dĺžka cyklu pri samotnom meraní	36
Obrázok 24: FPGA buffer.....	39
Obrázok 25: Riadiaci cyklus.....	40
Obrázok 26: Posielanie dát na Host-PC.....	41
Obrázok 27: Načítanie dát z FIFO pamäte	42
Obrázok 28: Regulátor pre vibračnú stolicu	43
Obrázok 29: P regulátor – návrh.....	45
Obrázok 30: Integrátor/derivátor delay 10 ms	46
Obrázok 31: PID počiatočný stav	48
Obrázok 32: PID konečný stav	48
Obrázok 33: Predný panel – nastavenia.....	49
Obrázok 34: Predný panel – test	50
Obrázok 35: Predný panel – spracovanie	51
Obrázok 36: Blokový diagram – inicializácia, sweep patern a kontrola spojenia.....	53
Obrázok 37: Blokový diagram – Sweep generation	54
Obrázok 38: Blokový diagram – spracovanie.....	55
Obrázok 39: Prepočet zrýchlenia	56

ZOZNAM TABULIEK

Tabuľka 1: Rozdelenie programu	37
--------------------------------------	----

ÚVOD

V súčasnej dobe je väčšina elektronických zariadení konštruovaná pre mobilné použitie. To so sebou prináša zvýšené riziko mechanického namáhania, ktoré môže nepriaznivo ovplyvniť spoľahlivú funkciu v ich prevádzke. Preto je nutné testovanie, a to nie len hotových zariadení, ale rovnako už v priebehu vývoja. Kde sú účinným prostriedkom vibračné testy, ktoré spolu so simuláciami môžu pozitívne ovplyvniť výsledné prevedenie tak, že ich rezonančný kmitočet nie je v oblasti bežného namáhania.

So sledovaním vibrácií a ich vplyvu na súčiastky či celé zariadenia sa bežne stretávame pri točivých elektrických strojoch, kde pomocou merania vibrácií je možné diagnostikovať poruchu stroja. Avšak oveľa menej v oblasti elektroniky. Vplyv vibrácií a mechanického poškodenia na elektronické súčiastky, dosky plošných spojov, spájkované a lepené spoje je práve oblasť, ktorej sa venuje pomerne málo odborných článkov a zariadenia pre testovanie vibrácií nepatria medzi jednoduché a z ekonomického hľadiska lacné.

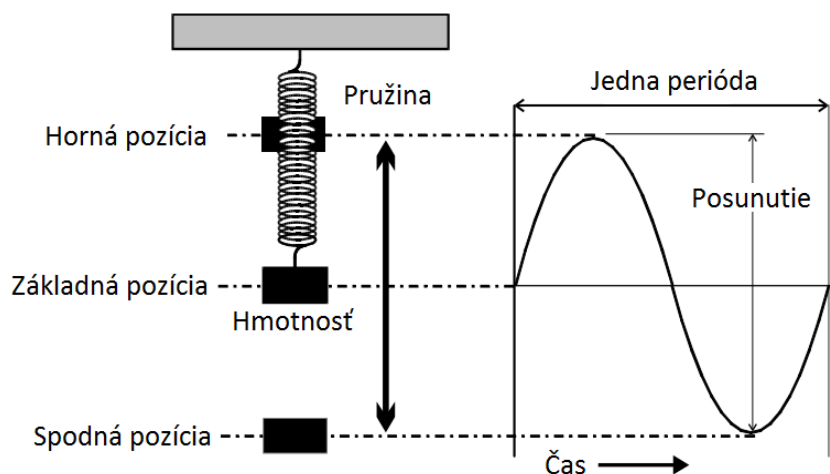
Vibračným testom sa venujú normy ISO 60068 a IPC-TM60, ktoré jasne stanovujú priebeh vibračných testov, ktorými majú elektronické zariadenia prejsť, aby mohla byť zaručená ich kvalita. Prechod na bezolovnaté spájkované spoje a stále menšie puzdrá používané v elektronickom a mikroelektronickom priemysle si vyžaduje čoraz viac pozornosti aj v oblasti vibrácií a ich vplyvov.

Cieľom predkladanej práce je zhotovenie pracoviska na sledovanie a testovanie vplyvu vibrácií na dosky plošných spojov a puzdrá používané v mikroelektronike.

1. VIBRÁCIE

S pojmom vibrácie sa väčšinou stretávame pri točivých strojoch, pri ktorých sa vibrácie používajú na sledovanie stavu stroja, na diagnostiku poruchy či priebežné sledovanie stavu stroja. Vibrácie však pôsobia ako vonkajší efekt aj na stojace stroje a zariadenia, a preto je nutné sa s nimi zaoberať aj v elektronickom priemysle. Sledovanie vplyvu vibrácií na spájkované spoje, SMD súčiastky či samotné dosky plošných spojov (PCB).

Vibrácie považujeme za chvenie, kmitanie predmetu s veľkou frekvenciou a nízkou amplitúdou. Vibrácie môžu byť periodické, ako napr. mechanický oscilátor, či náhodné, napr. pri jazde autom po náročnom teréne. V niektorých prípadoch je možné, že vibrácie vyžadujeme a stávajú sa nevyhnutnou podmienkou k správnej činnosti, ako napríklad pri harmonike či mobilnom telefóne. Vo väčšej časti prípadov sú však vibrácie nežiaduce a prejavia sa ako nežiaduci efekt (šum). [1,2]



Obrázok 1: Vibrácie – mechanické kmity

Poznáme dva typy vibrácií, a to „voľné vibrácie“ (*Free vibration*) a „vynútené vibrácie“ (*Forced vibration*). Po pojmom voľné vibrácie rozumieme, že objekt dostal počiatočné posunutie a sila na neho ďalej nepôsobí. Objekt začína oscilovať a pokračuje v pohybe. Žiadna vonkajšia sila nepôsobí na objekt počas oscilácií. Frekvencia voľných oscilácií je známa ako rezonančná (*natural*) frekvencia. Pri vynútených osciláciách ide o prípad,

keď na objekt pôsobí vonkajšia sila, ktorá udržuje objekt v osciláciách mimo jeho periodického pohybu. Frekvencia oscilácií je rovnaká ako frekvencia sily pôsobiacej na objekt. [3]

1.1 Vplyv vibrácií na DPS a spájkované spoje

Vplyv vibrácií na dosky plošných spojov a spájkované spoje je téma, ktorej sa nevenuje veľa odbornej literatúry a dá sa považovať za mierne podceňované súvislosti. V odborných článkoch môžeme nájsť poznatky, ktoré lepšie priblížia problematiku.

„Americké letectvo odhaduje, že vibrácie a šokové zmeny spôsobujú až 20 percent mechanických poškodení v elektronike. Preto je dôležité už v návrhu myslieť na to, aby použitá elektronika odolávala vibráciám a šokom. Najčastejšou poruchou sú poškodené spájkované vodiče, trhliny v spájkovanom spoji či trhliny v samotnej súčiastke.“ – uvádza sa v článku *Design Electronics for high Vibration and Shock*. Článok ďalej rozoberá potrebu, aby návrhári mysleli od začiatku na to, že obvody, DPS a samotné spoje musia byť odolné proti týmto vplyvom prostredia. Zdôrazňuje sa potreba vyhnúť sa rezonančnej frekvencii, ktorá spôsobuje najväčšie škody. Vibrácie a šoky majú značný vplyv na celkovú životnosť elektronických súčiastok a zariadení. Vplyv vibrácií na dosky plošných spojov má najväčší efekt práve vtedy, keď dochádza k vystaveniu objektu jeho rezonančnej frekvencii. Rezonančná frekvencia spôsobuje najväčšie škody, avšak aj ďalšie harmonické prinášajú poškodenie a zhoršenie kvality jednak DPS samotnej, jednak spojov medzi súčiastkami. Pretože v dnešnej dobe je stále viac aplikácií, ktoré vyžadujú nekonvenčné tvary a rozmery DPS, je potrebné si uviesť vzťah pre výpočet rezonančnej frekvencie, prevzaté z [4,5]:

$$f_2 = f_1 \left(\frac{a_1 b_1}{a_2 b_2} \right) \sqrt{\frac{E_2 h_2^2 \gamma_1 (1 - \mu_1^2)}{E_1 h_1^2 \gamma_2 (1 - \mu_2^2)}} \quad (1.1)$$

f – rezonančná frekvencia (Hz)

a – dĺžka (in)

b – šírka (in)

h – hrúbka (in)

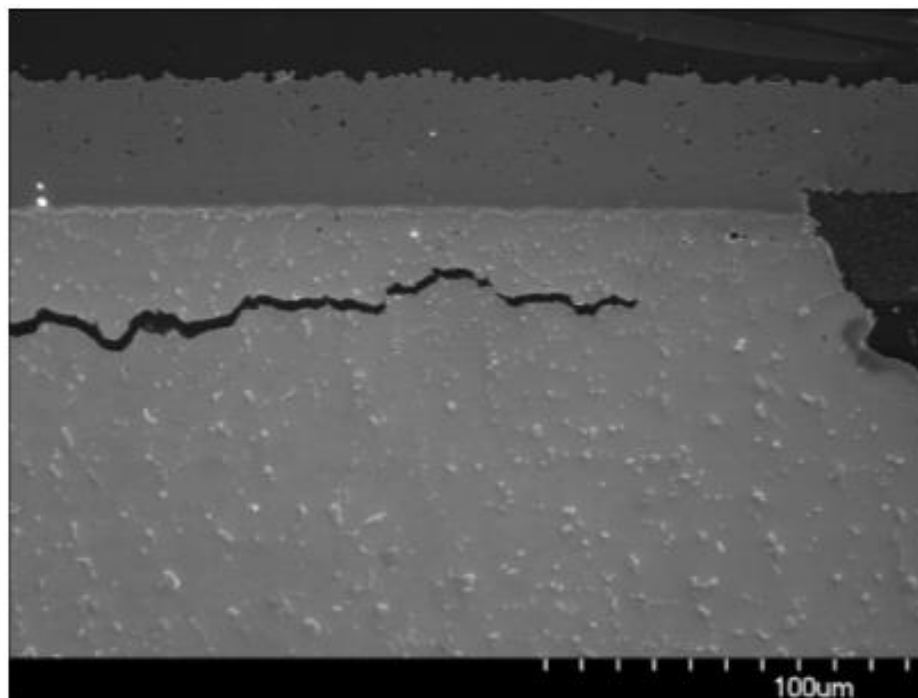
γ – hustota materiálu

μ – Poissonovo číslo

E – modul elasticity

Ak poznáme z akého materiálu je DPS vyrobená, materiálové konštanty nájdeme v tabuľkách. [4]

Rezonančná frekvencia môže výrazne ovplyvniť spájkované spoje, či už ide o puzdrá DIP, SO alebo BGA. Spolu s nástupom bezolovnatého spájkovania bolo by dobré sledovať nielen vplyv teploty, avšak aj vplyv vibrácií. Tejto oblasti sa venuje článok *Vibration Testing of repaired Lead-Tin/Lead-Free solder joints*, ktorý popisuje metodiku testovania a vyšetruje vplyv vibrácií a rezonančnej frekvencie na puzdrá DIP16, SO16 a BGA. Dôležitý poznatok je však ten, že bolo zistené, že na vibrácie najviac trpia puzdrá BGA, a to najviac okrajové spoje, pri ktorých dochádza k mechanickému poškodeniu a prasklinám.



Obrázok 2: Prasklina BGA puzdra spôsobená vibráciami [6]

DPS používané v automotive priemysle sú neustále vystavované namáhaniu, a to hlavne pokiaľ ide o teplotu, vlhkosť a vibrácie. Práve elektronické súčiastky v automotive sú navrhované tak, aby vydržali vibračnú záťaž, a práve tieto výrobky musia prejsť vibračnými skúškami, aby mohli byť použité v automotive odvetví.

Zreteľný je tiež tend miniaturizácie súčiastok a puzdier, prechod od QFP (*Quad flat pack IC packages*) k BGA (*Ball grid array*) a CSP (*chip scale packages*). Práve puzdrá sú najviac vystavované mechanickému zaťaženiu, teda vibráciám. Navyše prechod od konvenčne využívanej Sn-Pb eutektickej spájky k bezolovnatej – pre životné prostredie prijateľnejšej – spájke Sn-Ag-Cu spôsobuje, že testy spoľahlivosti nie sú pre túto spájku presne definované.

Výskum vibračného zaťaženia má za cieľ určiť nové normy pre testovanie zaťaženia vibráciami podľa experimentálnych výsledkov. Vibráciami môžu byť spôsobené tieto poruchy:

- poškodenie spoja v dôsledku namáhania spoja,
- poškodenie štruktúry spôsobené namáhaním,
- poškodenie spájkovaného spoja,
- strata súčiastky,
- nadmerné vychýlenie,
- poškodenie prívodov puzdier (DIL,DIP) [7,8].



Obrázok 3: Prelomený spoj [27]

1.2 Meranie vibrácií

Aby sme mohli vibrácie merať, je nutné zadať základné parametre a vzťahy medzi nimi. Patria sem: zrýchlenie (*acceleration*), rýchlosť (*velocity*) a posunutie (*displacement*).

Zrýchlenie definujeme ako prvú deriváciu rýchlosti podľa času, resp. druhú deriváciu polohového vektora podľa času vzhľadom na vytýčený priestor. Jednotkami zrýchlenia, v ktorých sa označuje pri vibračných skúškach, sú mm/s², m/s² a g.

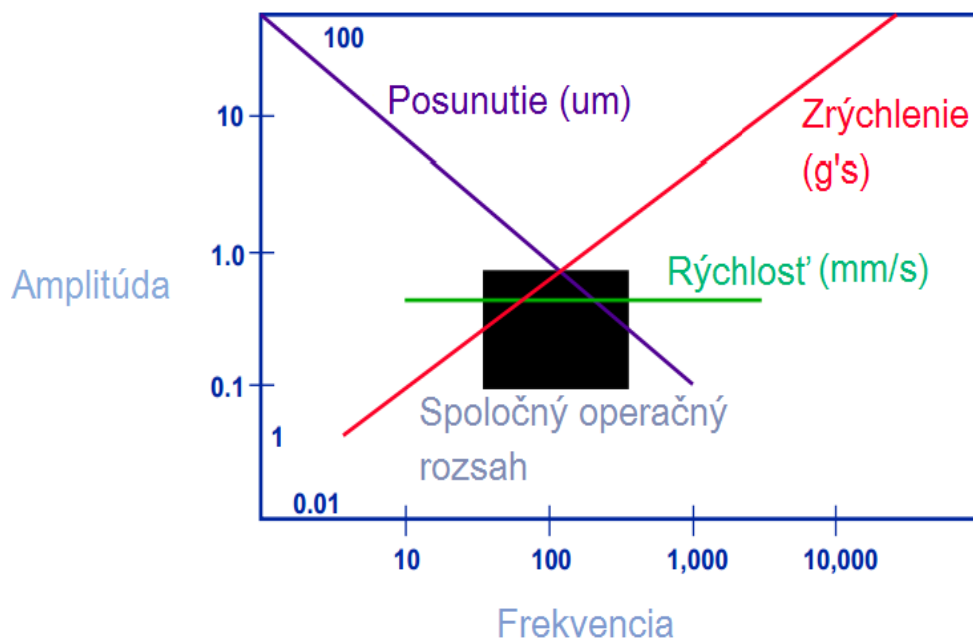
$$\vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt} \quad (1.2)$$

Rýchlosť definujeme ako zmenu polohy objektu za určitý čas, teda derivácia dráhy za čas. Jednotkami rýchlosti, ktoré sa používajú pri vibračných skúškach, sú mm/s a vdB v prípade logaritmickej mierky.

$$\vec{v} = \frac{ds}{dt} = \int a dt \quad (1.3)$$

Posunutie definujeme ako relatívnu polohu objektu voči fixnému bodu sústavy. Dva body v rovnakej vzdialenosti, avšak s opačným smerom k referenčnému bodu sústavy, vzdialenosť medzi nimi zodpovedá amplitúde s opačným znamienkom. [9]

$$x = \int v dt = \iint a dt \quad (1.4)$$



Obrázok 4: Vzájomné vzťahy

Medzi ďalšie dôležité parametre patria RMS, Peak-Peak, Peak, PSD či *TimeWaveform*, ktoré hovoria o tom, ako sa mení zrýchlenie, rýchlosť či posunutie.

Amplitúda vibrácií je vlastne magnitúda vibrácií, teda indikuje závažnosť vibrácií. Závažnosť vibrácií môžeme rozdeliť na:

- veľkosť posunutia,
- rýchlosť posunutia,
- silu spojenú s posunutím.

V mnohých prípadoch amplitúda rýchlosti alebo zrýchlenia nám dáva najpraktickejšie informácie o podmienkach používania zariadenia.

Pod pojmom *Peak* chápeme jednoducho maximálnu rýchlosť vibrácií. V kontraste RMS a Peak hovoríme o tom, že *RMS* hodnota vypovedá o energii. Čím vyššia hodnota RMS, tým vyššia hodnota vibračnej energie. RMS hodnota je vždy menšia ako hodnota Peak. Hodnota RMS sa nachádza medzi 50 % až 80 % maximálnej amplitúdy (Peak).

Frekvencia, alebo taktiež oscilácie, predstavujú opakované pohyby, ktoré závisia od sily, ktorá ich vyvolala, teda od vibračnej sily. Čím vyššia frekvencia, tým rýchlejšie oscilácie. Frekvenciu vibrácií môžeme definovať ako počet celých oscilácií, ktoré spočítame za jednu sekundu.

Priebeh je grafické zobrazenie elektrických signálov. V analýze vibrácií považujeme priebeh za grafickú reprezentáciu toho, ako sa mení veľkosť vibrácií v čase. Využívajú sa priebehy rýchlostí, zrýchlenie a posunutia v čase, ktoré zobrazíme ako priebeh. Priebeh rýchlosti hovorí, ako rýchlo vibruje daná časť zariadenia v určitom čase. [10]

1.3 Akcelerometre

Ide o zariadenia na meranie negravitačného zrýchlenia, teda s ich pomocou meriame zrýchlenie v jednej osi. Môžeme využiť aj akcelerometre, ktoré sú schopné merať zrýchlenie vo všetkých 3 osiach súčasne. Akcelerometre majú v priemysle veľké uplatnenie v mnohých aplikáciách. Vysoko citlivé akcelerometre našli uplatnenie napr. v systémoch lietadiel a rakiet. Používajú sa na detegovanie vibrácií pri pohyblivých aj statických zariadeniach.

Akcelerometre merajúce len v jednej osi sa používajú na zisťovanie magnitúdy a smeru zrýchlenia ako vektor rýchlosti. Môžu sa použiť aj na zistenie smeru vibrácií, merať šokové zmeny na zariadeniach. Mikro-akcelerometre stále častejšie nachádzame v prenosných elektronických zariadeniach pre zisťovanie polohy zariadenia. [11]

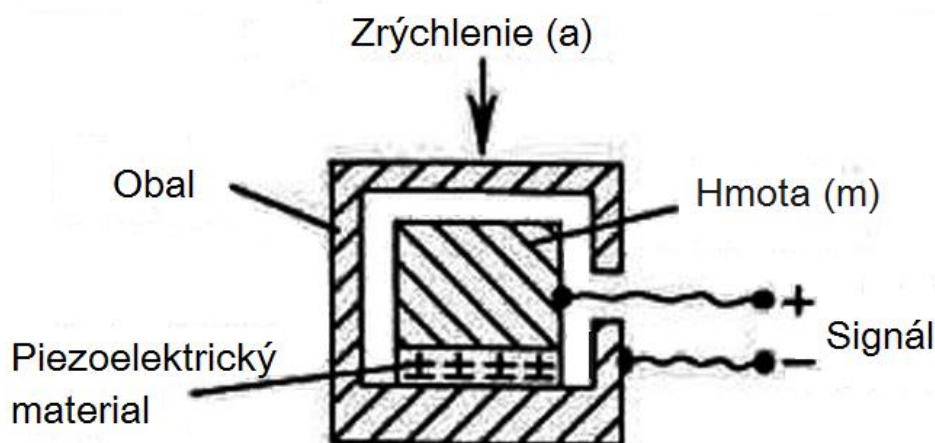
Môžeme ich rozdeliť na:

- piezoelektrické,
- piezorezistívne,
- tepelné,
- mems.

1.3.1 Piezoelektrické akcelerometre

Piezoelektrické akcelerometre vo svojej konštrukcii využívajú piezoelektrický materiál, ktorý vytvára náboj úmerný mechanickému namáhaniu vzniknutému pôsobením

zrýchlenia. Meranie náboja piezokryštálu prebieha buď priamo, alebo pomocou externej elektroniky s vysokou hodnotou vstupnej impedancie, alebo častejšie vnútorná elektronika senzora konvertuje náboj na napäťový výstup s nízkou impedanciou. [12]



Obrázok 5: Piezoelektrický akcelerometer

Jedna strana piezoelektrického materiálu je pripevnená na pevnú základňu senzora. Časť hmoty je pripevnená na piezosnímač. Ak je akcelerometer vystavený zrýchleniu, generovaná sila F , ktorá pôsobí na piezoelektrický element, spôsobí vygenerovanie náboja, resp. napätia na výstupe senzora. Podľa Newtonovho zákona je táto sila úmerná pôsobiacej sile. Pretože hmota má konštantnú hmotnosť, výstupný signál v podobe náboja je úmerný pôsobiacemu zrýchleniu. [12]

1.3.2 Piezorezistívne akcelerometre

Akcelerometre využívajú zmenu odporu piezokeramiky pri mechanickom namáhaní, vzniknutého pôsobiacim zrýchlením, pričom meranie odporu piezomateriálu prebieha prostredníctvom základného Wheatsonovho mostíka. Jednoduchá konštrukcia výstupu umožňuje napojiť senzor na jednoduchý vyhodnocovací obvod. Piezorezistívny akcelerometer je senzor, ktorý využíva piezorezistívny materiál namiesto piezoelektrického kryštálu, a jeho prostredníctvom prevádza silu vzniknutú urýchľovanou hmotou na zmenu odporu. V integrovaných piezorezistívnych akcelerometroch sa využíva sieť vyleptaných meracích piezorezistívnych snímačov

zapojených do Wheatsonovho mostíka. Piezorezistívne akcelerometre majú tú výhodu oproti piezoelektrickým, že s nimi môžeme merať aj nemenné zrýchlenie, t. j. od 0 Hz.

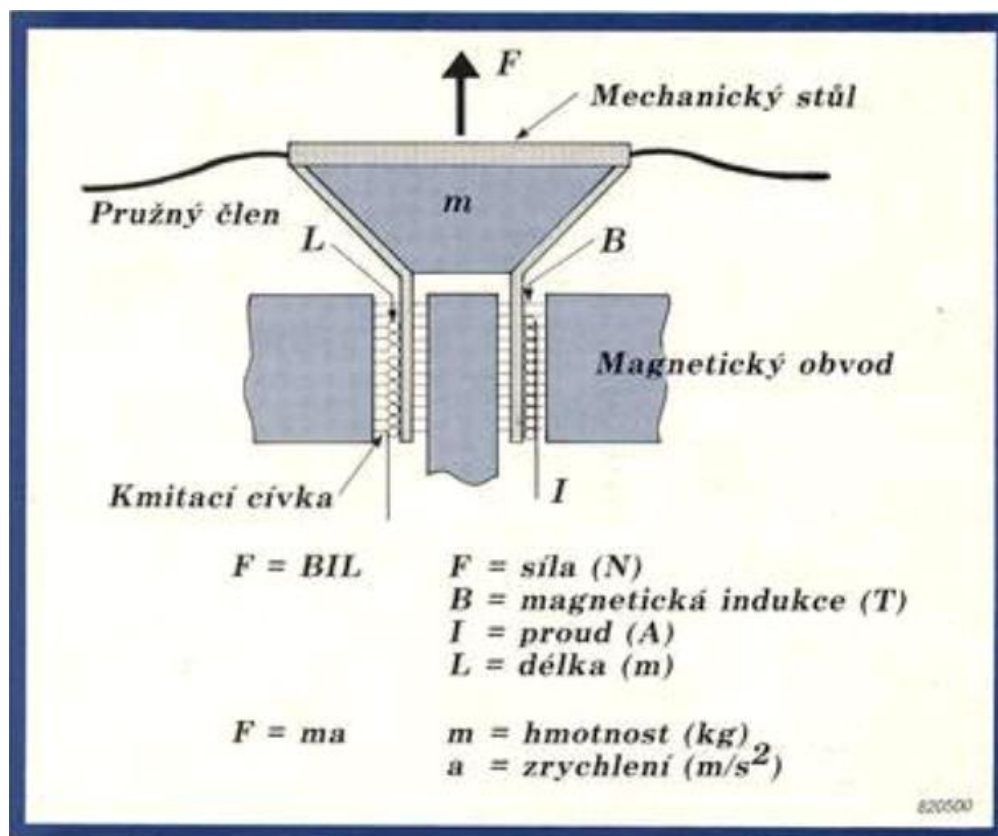
Ďalej je potrebné dodať, že pri akcelerometroch musíme sledovať ich dynamický rozsah a rovnako dôležitá je oblasť použitia, o ktorej vypovedá frekvenčná charakteristika.[12]

1.4 Zariadenia na testovanie vibrácií

Na meranie a testovanie vibrácií sa okrem už spomenutých akcelerometrov používajú aj ďalšie zariadenia, ako sú elektrodynamické budiče (valce), zosilňovače, zapisovacie zariadenia, funkčný generátor a ovládacia logika, ktorej sa budeme venovať v ďalšej kapitole. Okrem spomínaných elektrodynamických budičov, v praxi môžeme vidieť aj rôzne ďalšie „budiče“, ako napr. trojosové vibračné stoly, jednoosové vibračné stoly a pod. K dispozícii však bol iba malý elektrodynamický budič, preto sa zameriame práve na elektrodynamický budič a princíp jeho činnosti.

Elektrodynamický budič mechanických kmitov je vlastne v základnom princípe obyčajný reproduktor. Mechanický pohyb pohyblivých častí elektrodynamického budiča je vyvolaný prechodom elektrického prúdu jeho cievkou, umiestnenou v magnetickom poli. Sila vyvolávajúca pohyb častí je priamo úmerná prúdu, ktorý prechádza cievkou a indukcii magnetického poľa. Vďaka prúdovej závislosti sily je možné elektrickou cestou presne ovládať mechanický výstup elektrodynamického budiča.

Zdrojom magnetického poľa pri malých elektrodynamických budičoch je permanentný magnet, zatiaľ čo pri väčších a spravidla pri veľkých obsahuje jeden alebo niekoľko elektromagnetov. Maximálny prúd tečúci cievkou a maximálne mechanické zaťaženie určujú maximálne dosiahnuteľné zrýchlenie generované budičom.



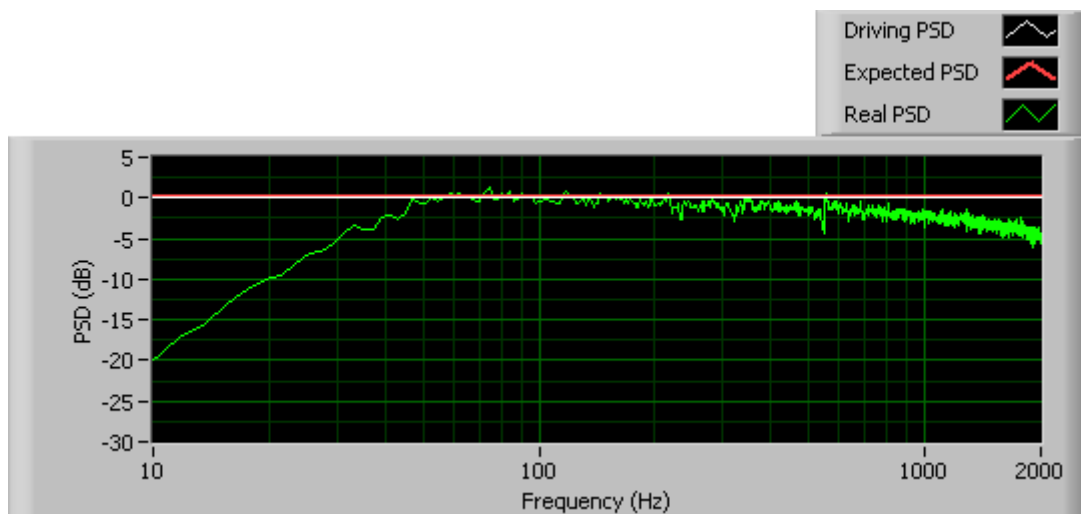
Obrázok 6 Elektrodynamický budič [13]

Kmitočtová charakteristika elektrodynamického budiča, ktorého cievkou preteká prúd s konštantnou amplitúdou, má tri výrazné a vzájomne odlišné oblasti. Prekrývajúce sa nízke a stredné frekvencie a tretiu oblasť nachádzajúcu sa v pásme vysokých kmitočtov. Obdobné tri vzájomne odlišné oblasti obsahuje aj frekvenčná charakteristika elektrodynamického budiča, ktorého cievka je pripojená k zdroju napätia s konštantnou amplitúdou. Rezonancia v pásme nízkych kmitočtov je však podstatne utlmená. Preto tento efekt sa dáva prednosť výkonovému zosilňovaču s malým výstupným odporom pracujúcemu ako napäťový zdroj. V niektorých prípadoch je však výhodnejšie použitie výkonového zosilňovača s veľkým výstupným odporom, teda zapojeného ako zdroj prúdu. Moderné výkonové zosilňovače pre použitie k elektrodynamickým budičom sú zvyčajne vybavené možnosťou voliť medzi malým a veľkým výstupným odporom. [13]

1.5 Prečo potrebujeme vibrácie riadiť

Vibračný stôl nebude presne kopírovať požadovaný signál, bez patričnej korekcie vstupných hodnôt. Na príklad, ak aplikujeme biely šum cez zosilňovač priamo na vibračný stôl. Vibračný stôl nebude generovať požadovaný biely šum s hladkou spektrálnou hustotou, ako by sme požadovali. (Obrázok 7)

V dôsledku základných charakteristík vibračného stola plus samotnej konštrukcie, skutočná odozva vibračného stola je zosilnená alebo zoslabená na rôznych frekvenciách. Bez adekvátnej kompenzácie pre základné frekvencie vibračného stola a zosilňovača sa bude výkonová spektrálna hustota odlišovať od požadovanej. Prevzaté z [14]



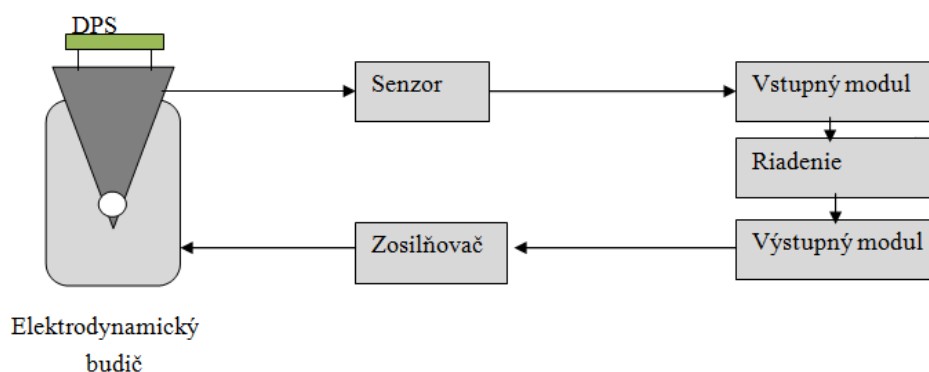
Obrázok 7: PSD vibračného stola bez kompenzácie [14]

2. REGULÁCIA VIBRÁCIÍ

Základným poznatkom pre meranie vibrácií je uzavretá slučka vibračného systému, ktorú častejšie označujeme ako „riadenie vibrácií“ (*vibration control*). Pre správne meranie vibrácií a riadenie vibračného systému budeme potrebovať systém, ktorý môžeme rozdeliť na tri časti, a to:

1. Funkčný generátor, výkonový zosilňovač a elektrodynamický budič
2. Spätnoväzobný obvod, akcelerometer, filter a zobrazovaciu časť
3. Riadiacu jednotku

Na Obrázok 8 je vidieť typickú schému systému na meranie a riadenie pri vibračných skúškach. Signál vychádza z funkčného generátora, prechádza cez výkonový zosilňovač, ktorý ho výkonovo prispôsobí pre elektrodynamický budič. Ten premení elektrický signál na mechanické kmity prechádzajúce substrátom. Úroveň vibrácií je meraná jedným alebo sústavou akcelerometrov, ktoré pracujú v spätnej väzbe a posielajú signál späť do riadiacej jednotky (počítač, riadiaca jednotka) a tá porovnáva vyslaný signál so signálom z akcelerometrov a vykonáva prispôbenie, čomu hovoríme riadenie vibrácií. V jednoduchších systémoch sa využíva vibrovanie len v jednej osi, pri zložitejších systémoch je možné riadenie vibrácií vo všetkých troch smeroch. [15,16]



Obrázok 8: Vibration control system

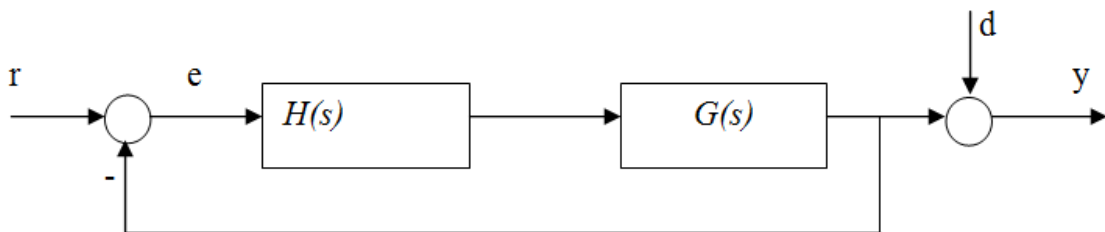
2.1 Techniky regulácie vibrácií

Poznáme dva základné algoritmy pre reguláciu vibrácií, ktoré sa od seba výrazne odlišujú, a to „spätnú väzbu“ (*Feedback*) a *Feedforward*. Je však dôležité si uvedomiť, že obidva algoritmy majú svoje výhody a nevýhody a každý sa viac či menej hodí na aplikáciu, ktorú potrebujeme.

Ďalšou vhodnou metódou, ktorá sa využíva na reguláciu či potlačenie šumu, je kombinácia oboch vyššie spomenutých metód spolu s adaptívnym filtrom postaveným na základe algoritmu LMS, tejto metóde sa tiež hovorí „aktívna opačná regulácia“ (*Active inverse control*). [14,16]

2.1.1 Feedback

Princíp regulácie pomocou spätnej väzby (*Feedback*) je znázornený na Obrázok 9, výstup y systému je porovnávaný s referenčným vstupom r a chybový signál $e = r - y$, prechádza do kompenzačného člena $H(s)$, ktorý ho aplikuje na systém $G(s)$. Problém návrhu je v nájdení správneho kompenzačného člena, správny vzťah tak, aby systém bol aj vďaka spätnej väzbe stále stabilný a výsledok regulácie prijateľný.



Obrázok 9: Feedback princíp

U systémov, ktoré vykazujú iba ľahké tlmenie (vibrácie), je spätnoväzobné riadenie použité na dve podstatné úlohy, a to: aktívne tlmenie a spätnoväzobné riadenie podľa známeho modelu.

Úlohou aktívneho potlačenia vibrácií je potlačiť vysoké magnitúdy v rezonančných frekvenciách vďaka uzavretej slučke.

$$F(s) = \frac{y(s)}{r(s)} = \frac{GH}{1+GH} \quad (2.1)$$

V tomto prípade $F(s)$ je veľmi blízke $G(s)$, presnejšie je blízko rezonančnej frekvencii, kde potlačuje amplitúdu. Aktívne potlačenie môže byť dosiahnuté zmierneným zosilnením alebo lepšou vlastnosťou môže byť dosiahnutie požadovaného tlmenia, bez znalosti štruktúry, avšak s garanciou stále stabilného systému riadenia. Na to však potrebujeme správne usporiadanie atenuátorov a senzorov. Senzory a atenuátory však nemajú nekonečné spektrum použiteľnosti a systémy pre reguláciu vibrácií majú konečnú šírku pásma, v ktorom môžu pracovať.

Pre riadenie môže byť náročnejšie udržať požadovanú hodnotu riadiacej veličiny v pásme tolerancií, pri pôsobení vonkajších rušení v určitom frekvenčnom pásme.

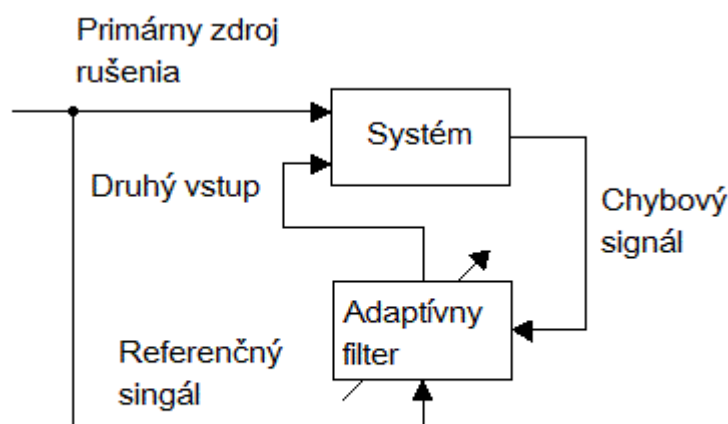
$$\frac{y(s)}{d(s)} = \frac{1}{1+GH} \quad (2.2)$$

Preto pre potlačenie vonkajších vplyvov potrebujeme veľké hodnoty GH vo frekvenčnom pásme, kde rušenie vzniká. Z rovnice (2.2) vidíme, že ak $GH \gg 1$ znamená to, že v uzavretej slučke je funkcia $F(s)$ blízko 1, čo znamená, že výstup y sleduje vstup r presnejšie. Pre dosiahnutie takejto presnosti potrebujeme komplikovanejšiu stratégiu zahrnujúcu matematický model daného systému. Poznáme mnoho metód ako nájsť vhodný kompenzačný člen, ideálne sú jednoduché a prispôsobiteľné. [16]

2.1.2 Feedforward

Ak máme k dispozícii signál korelovaný k poruche, potom môžeme využiť model feedforward, prispôsobujúcu filtráciu, ktorá je atraktívna alternatíva k spätnoväzobnému riadeniu pre potlačenie rušenia. Pôvodne bolo toto potlačenie porúch vymyslené pre potlačenie šumu, avšak našlo využitie taktiež pre riadenia vibračných systémov. Princíp je znázornený na Obrázok 10. Metóda je založená na prítomnosti referenčného signálu

a korelovaného spolu s poruchou (označovaný tiež ako „trénovací signál“), tento signál prechádza cez prispôsobivý filter, výstup z filtra je aplikovaný ako druhý zdrojový vstup pre systém. Koeficienty filtra sú prispôsobiteľné podľa aktuálneho chybového signálu, pre minimalizáciu jedného či viacerých kritických bodov. Predstava je taká, že pre potlačenie produkujeme ďalšie rušenie, ktorým potlačíme pôvodné, ktoré bolo lokalizované vďaka chybovému senzoru. Samozrejme, nemáme garanciu, že celková odozva bude potlačená aj na ostatných miestach, ak nie je odozva dominantná. Sú tu však miesta, kde odozva môže byť zosilnená. Preto sa môžeme domnievať, že je lokálna, v porovnaní so spätnoväzobným riadením, ktoré je globálne. Na rozdiel od aktívneho tlmenia, ktoré môže potlačiť rušenie len v blízkosti rezonančnej frekvencie, feedforward pracuje pre akékoľvek frekvencie a pokúša sa potlačiť rušenie úplne, keďže vytvára druhý signál s opačnou fázou.



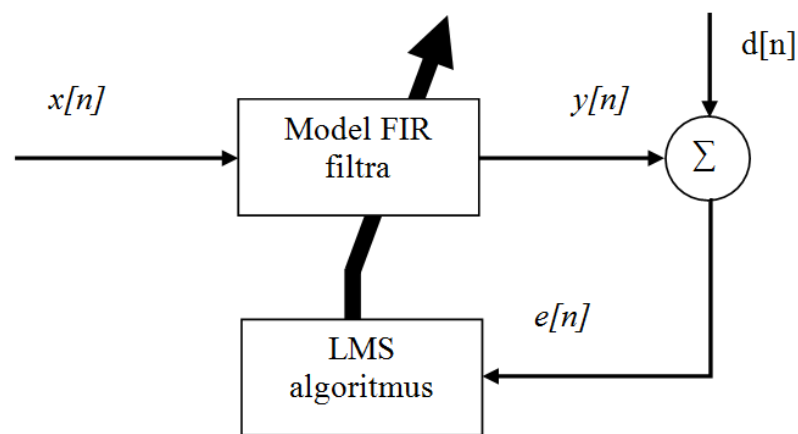
Obrázok 10: Princíp Feedforward

Metóda nepotrebuje model systému, ale proces prispôsobenia je závislý od nameranej impulzovej odpovede. Koncept pracuje lepšie pre úzko-pásmové poruchy, ale môže byť použitý aj pre široko-pásmové aplikácie. Pretože je menej náchylný na zmenu fázy ako spätná väzba, je možné feedforward riadenie použiť aj pre vyššie frekvencie, práve preto našiel feedforward využitie v akustike. Hlavným obmedzením feedforward adaptívneho filtra je prítomnosť referenčného signálu korelovaného k poruche. Existuje

však veľa aplikácií, kde signál načítame zo senzora, ktorý je umiestnený priamo v línii rušenia. [16]

2.1.3 Metóda najmenších štvorcov – LMS

Metóda najmenších štvorcov je matematicko-štatistická metóda pre aproximáciu riešenia sústav diferenciálnych rovníc. [17] Algoritmus založený na metóde najmenších štvorcov našiel uplatenie pri návrhu a realizácii adaptívnych filtrov, kde sa metóda využíva na nájdenie vhodných koeficientov filtra. Ide o metódu náhodného gradientu sklonu, teda filter sa snaží dosiahnuť požadovaný signál na základe chybového signálu v aktuálnom čase (Obrázok 11). [18]



Obrázok 11: Model adaptívneho FIR filtra

Algoritmus adaptívneho filtrovania na základe LMS navrhli v roku 1959 páni Windrow a Hoff ako príklad na kontrolovaný tréning, kde boli pravidlá určenia nastavené ako niekoľko príkladov požadovaného správania. Máme dvojice $\{x[0], d[0]\}$ $\{x[0], d[0]\}$... $\{x[N-1], d[N-1]\}$, ktoré reprezentujú vstup systému, $d[n]$ považuje za korelovaný signál so vstupom. Každú vzorku vstupu (LMS pracuje buď po vzorkách, alebo po blokoch) aplikujeme na sieť, teda výstup je porovnaný s požadovanou hodnotou. LMS algoritmus na základe výstupu nastaví koeficienty filtra tak, aby MSE (Mean square error – stredná kvadratická chyba) bola čo najmenšia. [19]

$$MSE = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} e^2[n] = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} [d[n] - y[n]]^2 \quad (2.3)$$

Kde $e[n]$ je chybový signál a $d[n]$ je požadovaný výstupný signál. Ako bolo vyššie spomenuté, LMS pracuje na základe stochastického gradientu adaptácií (*gradient descend algorithm*), takže využíva strmosť vektora na úpravu koeficientov filtra, a teda konverguje k optimálnemu riešeniu Wienerovho filtra. Koeficienty filtra sa upravujú každou iteráciou a na základe rovnice:

$$W[n] = W[n-1] + 2\mu \cdot e[n] \cdot X[n-1] \quad (2.4)$$

Kde $W[n] = [w_0 \ w_1 \dots w_{L-1}]$ je vektor koeficientov filtra, $X[n] = [x_n \ x_{n-1} \dots x_{n-L+1}]$ je vektor vstupných hodnôt signálu, L prezentuje najčastejšiu hodnotu na vstupe a μ je faktor konvergenzie alebo veľkosť kroku. Tento faktor kontroluje stabilitu a rýchlosť konvergenzie adaptívneho algoritmu. [20,21] Výstup LMS filtra je:

$$Y[n] = W[n-1]^T \cdot X[n] \quad (2.5)$$

Štandardný LMS algoritmus (LabVIEW) prechádza týmito operáciami, podľa ktorých upravuje koeficienty filtra:

1. Spočíta výstupný signál $y(n)$ adaptívneho filtra.
2. Vypočíta chybový signál $e(n)$ na základe rovnice $e(n) = d(n) - y(n)$.
3. Aktualizuje koeficienty filtra na základe rovnice:

$$\vec{w}(n+1) = \vec{w}(n) + \mu \cdot e(n) \cdot \vec{u}(n) \quad (2.6)$$

kde μ je veľkosť kroku filtra, $w(n)$ je vektorový koeficient filtra, $u(n)$ je vstupný vektor filtra a $e(n)$ je chybový signál. [14]

2.1.4 PID regulátory

Základy PID regulácie sa objavili už na začiatku 20. storočia. V roku 1911 spojil E. Sperry PID regulátor s gyroskopom a autopilotom. V roku 1942 publikovali J. G. Ziegler a N. B. Nichols svoju metódu nastavovania automatických regulátorov. Namiesto proporcionálnej, integračnej a derivačnej zložky sa však používalo označenie citlivosť (sensitivity), automatic reset a pre-act time. PID regulátor je aj v dnešnej dobe najčastejšie používaným regulátorom. Jeho výhody spočívajú v jednoduchosti jeho nastavenia a optimalizácii či adaptácii jeho parametrov. Dosiahnutá kvalita regulačného pochodu je v mnohých praktických prípadoch porovnateľná, prípadne iba o málo horšia ako pri použití iných regulačných algoritmov, ktorých nastavenie a optimalizácia si vyžaduje skúseného odborníka.

Základná rovnica PID regulátora:

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_e^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (2.7)$$

K je zosilnenie PID regulátora

T_i je integračná časová konštanta

T_d je derivačná časová konštanta

$e(t)$ je regulačná odchýlka

$u(t)$ je akčný zásah regulátora.

Proporcionálna zložka regulátora (zosilnenie K) realizuje prirodzenú akciu regulátora. Integračná konštanta odstraňuje trvalú regulačnú odchýlku, avšak zhoršuje stabilitu regulačnej slučky a spomaľuje regulačný jav. Derivačná zložka – ak je správne

použitá – zlepšuje stabilitu a skracuje dobu prechodného deja. Veľká derivačná konštanta môže kvalitu regulačného deja výrazne zhoršiť. Prevzaté z [22].

3. TESTY PRE VIBRAČNÉ SKÚŠKY

Medzi najčastejšie typy vibračných skúšok patrí náhodný šum, sínusový signál alebo šokový test. Testov sa však v praxi používa oveľa viac, medzi ďalšími by sme mohli spomenúť *Sine on Random*, *Swept sine on random*, *Random on Random*, *Sine and Random on Random*, *Road simulation* a ďalšie. V krátkosti predstavíme tri najzákladnejšie testy a pozrieme sa na vibračné testy používané v spoľahlivosti. Vibračné testy a skúšky sa riadia príslušnými normami, kde presne nájdeme popis metódy testovania, frekvencie a k nim odpovedajúce amplitúdy.

Vibračné testy stanovuje norma IPC TM-650 2.6.9, v ktorej môžeme nájsť dva základné testy používané pre skúšky životnosti. Ide o tieto testy:

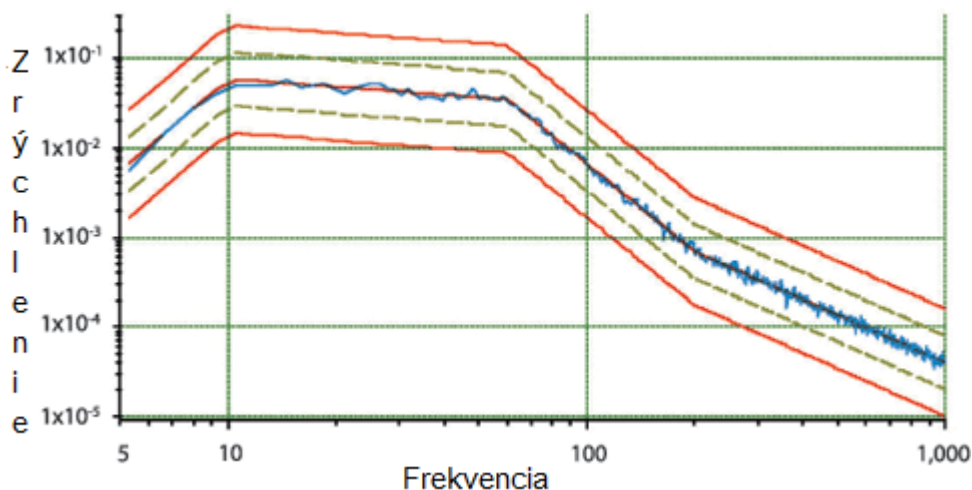
Cyklický test – jedná sa o postupné zvyšovanie frekvencie od 20 Hz do 2 kHz a následne späť na 20 Hz. Tento cyklus by podľa normy mal trvať 16 minút. Zrýchlenie by malo dosiahnuť hodnotu 15 G v celom frekvenčnom pásme. [23]

Rezonančný test – pri rezonančnom test vystavujeme substrát vibráciám na rezonančnej frekvencii, teda prvej harmonickej, presne 30 minút. Zrýchlenie, ktoré musíme dosiahnuť, je aspoň 25 G. Meriame jednak zrýchlenie na stoličnici, jednak na substráte, na substráte by nemalo prekročiť 100 G. [24] V norme ISO 60068-2 nachádzame testy, ktoré boli spomenuté na začiatku, a teda sínusový test, náhodné vibrácie a šokový test. Náhodný šum je definovaný ako spektrum so špecifickými frekvenciami a zodpovedajúcimi magnitúdami. Fáza na jednotlivých frekvenciách je náhodná a nie je vopred určená. Náhodný šum ako testovacia predloha je najčastejšie používaná vo vesmírnom a vojenskom odvetví, kde najlepšie kopíruje aplikácie ako vystrelenie rakety či jazdu vozidla po drsnom teréne. Testy rozmetaným sínusovým signálom vychádzajú zo starších technológií, keď boli k dispozícii len oscilátory a testovanie spočívalo v rozmetaní od počiatočnej do konečnej frekvencie podľa vopred definovaného vzoru. Posledným spoločným testom pri vibračných systémoch je šokový test, ktorý je definovaný klasickými krivkami (polovičný sínus, píla, impulzy atď.) alebo spektrom. Šokový test najlepšie kopíruje udalosti z oblasti pyrotechniky. [23]

3.1.1 Test – náhodné vibrácie

Pretože v „reálnom svete“ nemáme vibrácie sínusového typu, sínusový test je limitovaný na vibračné skúšky v priemysle. Potrebujeme však lepšie definovať náhodné procesy a deje. Práve v týchto oblastiach našli uplatnenie náhodné vibrácie.

Jeden z najdôležitejších dôvodov použitia náhodných vibrácií pri skúšobných testoch je, že substrát je vystavený poruche, takže je možné sa dozvedieť oveľa viac o jeho najslabších miestach. Pre určenie vzoru náhodných vibrácií sa využíva výkonová spektrálna hustota (PSD), ktorá slúži na zobrazenie priebehu. Príklad môžeme vidieť na Obrázok 12.



Obrázok 12: Typický PSD profil vibračného testu [26]

Graf zobrazuje závislosť zrýchlenia na jednotku frekvencie v logaritmickom zobrazení. V grafe jasne definujeme priemerné zrýchlenie náhodného signálu (používa sa biely šum) na každej frekvencii z daného rozsahu. Norma ISO 60068-2 predpisuje pre test náhodnými vibráciami zrýchlenie 19 G a dĺžka testu by mala byť 90 minút.

Testy náhodných vibrácií sú riadené v uzavretej spätnoväzobnej slučke. PSD takisto demonštruje ako „ťažko“ elektrodynamický budič pracuje, avšak neposkytuje nám žiadne informácie o tom aké sily a kde pôsobia na testovaný substrát.

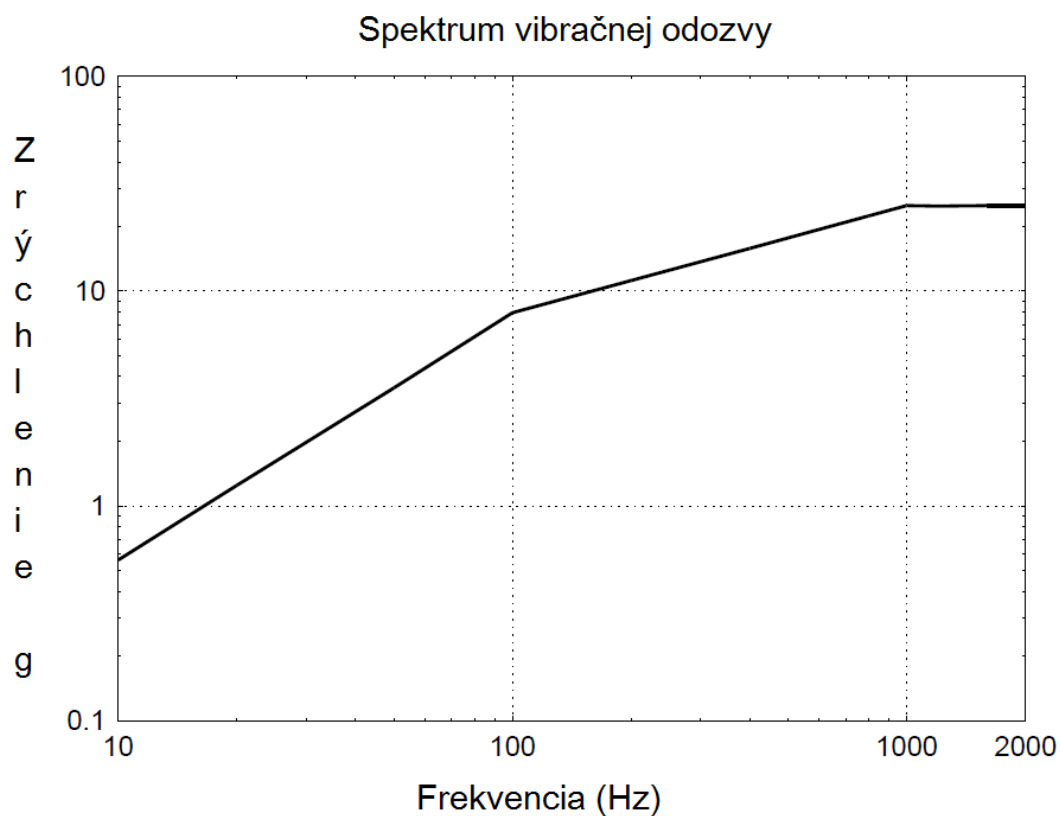
V prípade analógových systémov náhodných vibrácií bola najväčšia nevýhoda v nutnosti dlhého nastavovania sústavy filtrov, ktoré slúžili na vytváranie a následné riadenie náhodného spektra. Problém sa vyriešil vďaka príchodu systémov založených na počítačoch a digitálnych filtroch, ktoré počítač sám nastavuje podstatne rýchlejšie. [15,25,26]

3.1.2 Test – rozmetaný sínus

Sínusové testy, ako už bolo spomenuté, sa používajú v praxi dlhšie ako test náhodný šum a stretnúť sa s nimi je možné od čias oscilátorov. Sínusové testy pomôžu vykonať určité špecifické úlohy. Typickým príkladom je impulzná charakteristika produktu po povrchovej montáži. Test presne určí rezonančné frekvencie substrátu a zároveň antirezonančné frekvencie, ktoré sa prejavujú ako miesto s maximálnym a minimálnym zrýchlením. Substrát je počas sínusového testu podrobený skúškam len v jednom smere, typicky v smere osi x . Avšak impulzová odpoveď môže byť vo všetkých troch osiach.

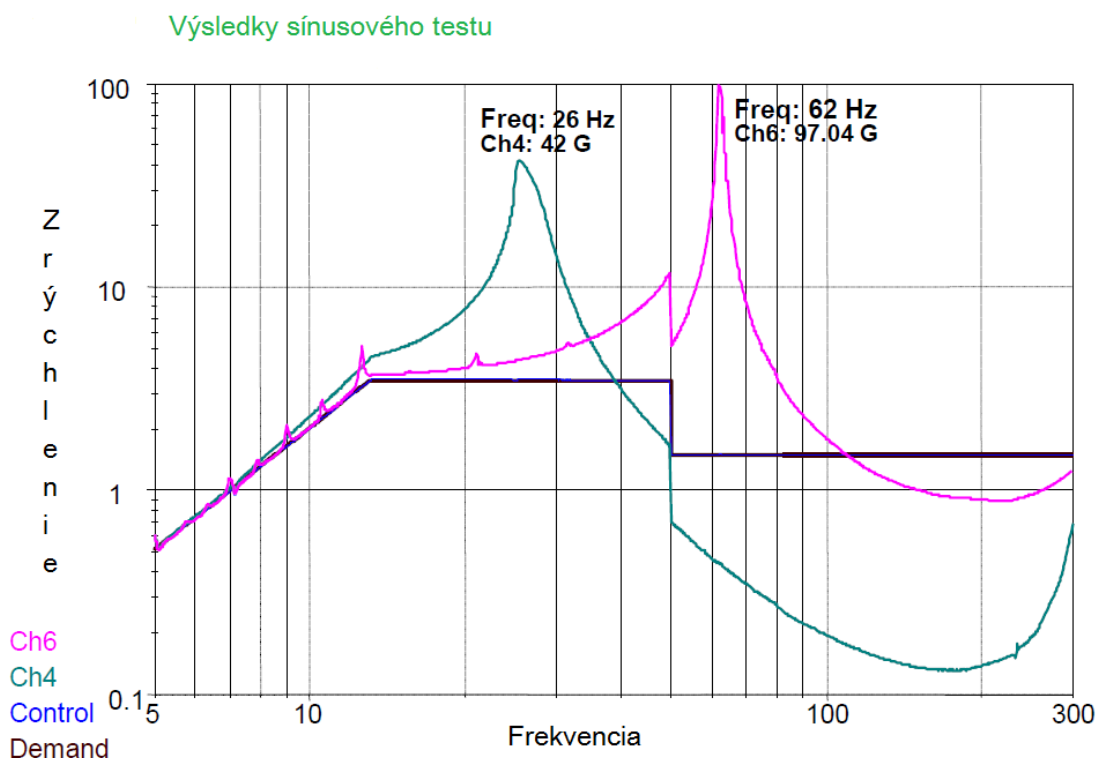
V ideálnom prípade je frekvenčný rozsah a dĺžka (čas) testu vopred definovaná, vďaka čomu je možné predvídať životnosť produktu. Parametre potrebné pre sínusový test sú počiatočná a konečná frekvencia signálu, ako dlho test bude trvať a, samozrejme, úroveň vibrácií, ktorým má byť substrát vystavený. V norme ISO 60068-2 sa pre sínusový test uvádza predpísané zrýchlenie 5 G frekvenčný rozsah 5 Hz až 500 Hz. Frekvenčný rozsah by sa mal opakovať 5 až 10-krát.

Typický vstup pre sínusový test vo forme spektrálnej hustoty zrýchlenia (*Akceleration spectral density, ASD*) je na Obrázok 13.



Obrázok 13: Vstupný profil pre sínusový test [27]

Ako už bolo spomenuté, medzi vstupné parametre patria frekvenčný rozsah a úroveň zrýchlenia, vďaka týmto hodnotám a impulzovej charakteristike je program automaticky schopný spočítať posunutie, zrýchlenie a rýchlosť, a to všetko v celom frekvenčnom rozsahu. Aby sa teda dali určiť rezonančné frekvencie, potrebný je viackanálový systém, ktorý preloží vstupnú krivku s výstupnou. Výsledok je vidieť na Obrázok 14. [27]



Obrázok 14: Odpoveď na sínusový test z dvoch kanálov [27]

3.1.3 Test – šok

V histórii vibračných skúšok boli zariadenia pre šokové testy navrhnuté ako „padajúci stôl“, v základe to bolo pár stĺpov s ťažkou základňou, nastaviteľnou pohyblivou časťou (Obrázok 15), na ktorú sa upevnil testovací substrát. Akcelerometer je umiestnený na pohyblivej časti, kde sleduje odozvu pri páde pohyblivej časti. V starších systémoch sa hodnota zrýchlenia zapisala priamo do grafu. Z grafu bolo jasne vidieť, či test prebehol podľa požiadaviek, alebo nie. Pre každý nový testovací substrát bolo potrebných najprv niekoľko skúšobných testov, aby sa dosiahli požadované parametre testov.

V dnešnej dobe však dokážu elektrodynamické budiče obsiahnuť aj šokové testy, a teda pôvodné mechanické konštrukcie sú nahradené digitálnymi systémami, ktoré dokážu vytvoriť ľubovoľné priebehy či pulzy, ktoré je možné sledovať buď jednotlivo, alebo opakovane – podľa toho, ako potrebujeme. [15]



Obrázok 15: Zariadenie pre šokový test [zdroj:www.fabreka.com]

4. PRAKTICKÁ ČASŤ

4.1 Návrh riadenia

Pretože problematika riadenia je pomerne zložitá záležitosť, pre lepšie pochopenie problematiky bolo zvolené ako prvé riadenie pomocou PID regulátora, ktorý bol aplikovaný pre riadenie technologického procesu spájkovania. Keďže projekt regulácie a monitorovania procesu spájkovania bol v inertnej atmosfére úspešný a podobný algoritmus bol jednou z možností aj pre riadenie vibračného valca, je preto daný projekt uvedený ako priblíženie k tomuto spolu s zmenami medzi jednotlivými verziami.

4.1.1 PID regulátor v LabVIEW

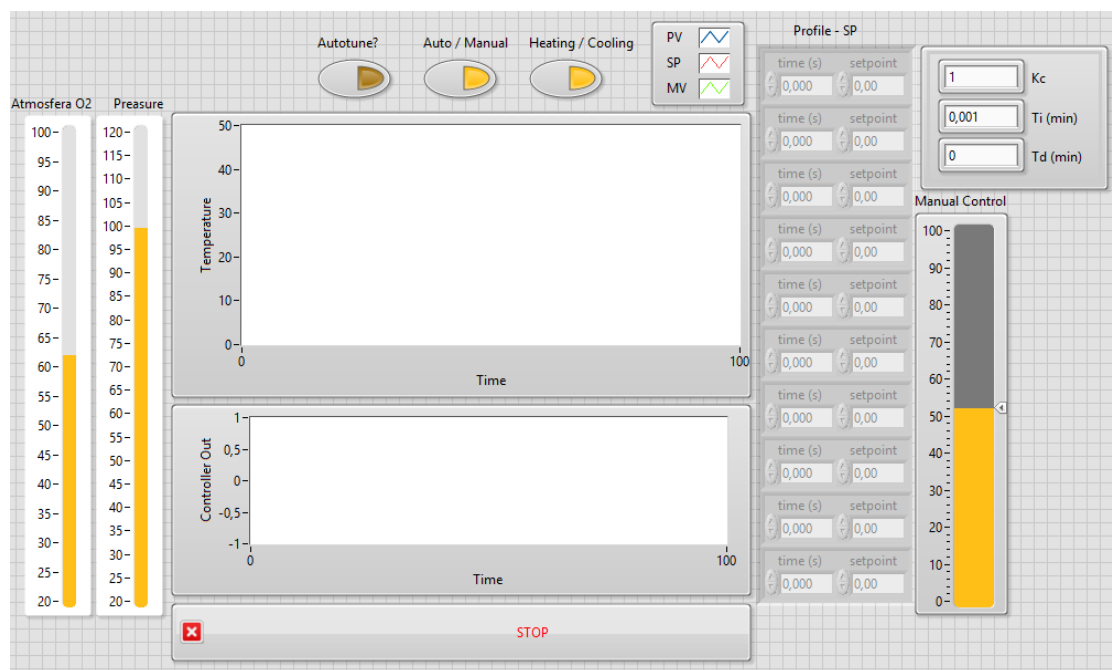
Pre návrh regulácie teploty bolo použité vývojové prostredie LabVIEW, a to pre jednoduchosť a efektivitu práce s týmto prostredím. Navyše bol k dispozícii aj hardvér od spoločnosti *National Instruments*, ktorá je autorom prostredia LabVIEW. Regulátor, ktorý by mal byť navrhnutý, má slúžiť na reguláciu procesu spájkovania v inertnej atmosfére. Na tieto účely existujú, samozrejme, priemyselné regulátory, avšak ich nevýhoda je v tom, že je nutné ich ručne nastavovať, na čo je dobré mať hlbšie znalosti z oblasti automatizácie. Hlavným problémom je však, že ručné nastavovanie zaberá príliš veľa času a rieši len reguláciu nábehu teploty. Regulácia chladenia už chýba a nie je riešená najvhodnejším spôsobom. Medzi ďalšími potrebami sa objavili požiadavky na to, aby bolo možné sledovať tlak vnútri exsikátora a takisto objem dusíka. Princíp a požiadavky zostali v každej verzii rovnaké, bolo však nutné korigovať presnosť a zlepšovať účinnosť nielen regulátora, ale aj programu samotného.

4.1.2 Popis PID Regulátora

Pre návrh regulátora v LabVIEW bol využitý modul *PID and Fuzzy Logic Toolkit*, vďaka ktorému bol vývoj systému podstatne rýchlejší. Keďže program mal obsahovať aj ďalšie moduly, bola zvolená modulárna štruktúra. Program bol teda koncipovaný ako

stavový automat, ktorý prechádza medzi tromi stavmi, pričom väčšinu času sleduje teplotu. Hodnoty tlaku a dusíka sa nemenia príliš často, takže im postačuje menej pozornosti. Program bol navrhnutý ako čo najjednoduchší, aby orientácia v programe nebola zložitá, zároveň však bola snaha dodržať odporúčané postupy práce s LabVIEW.

Na Obrázok 16 je možné vidieť predný panel programu, na ktorom v pravej časti vidieť *cluster* pre nastavenie spájkovacieho profilu, nastavuje sa konkrétny čas a teplota. Tento *cluster* vytvára krivku SP (*Set Point*), ktorá sa na grafe zobrazuje ako červená čiara, znamená prepočítanú čiaru. Na grafe rovnako možno vidieť krivku PV (*Process Variable*), ktorá predstavuje spätnú väzbu a zobrazuje aktuálnu teplotu. V ideálnom prípade sa krivky PV a SP prekrývajú.



Obrázok 16: Predný panel

Nad grafom je možné vidieť trojicu ovládacích prvkov, pri ktorých už samotný názov napovedá ich funkciu. Prvým sa spúšťa Automatické nastavenie regulátora – spustí sa *Autotuning wizard* – a nasleduje niekoľko krokov, v ktorých systém automaticky nastaví hodnoty PID regulátora na základe Ziegler-Nicholsovej metódy. Len čo sa skončí automatické nastavovanie, nové hodnoty sú aktualizované. Zvyšné dve tlačidlá

slúžia na prepínanie medzi automatickým a manuálnym režimom a prepínanie medzi zahrievaním a ochladzovaním.

V ľavej časti sa nachádzajú indikátory „Pressure“ a „Atmosfera O₂“, ktoré sledujú atmosféru a tlak v exsikátore. V pravej časti, okrem vyššie spomínaného spájkovacieho profilu, sa nachádza „tank“ na manuálne ovládanie SP a aktuálne hodnoty PID regulátora:

- Kc – zosilnenie,
- Ti – integračná časová konštanta (udáva sa v minútach),
- Td – derivačná časová konštanta (udáva sa v minútach).

Od uvedenia prvej verzie, ktorá bola popísaná v predchádzajúcich odsekoch, prešiel aj predný panel niekoľkými zmenami. V druhej verzii bol predný panel pozmenený, pretože bol pozmenený výpočet regulačnej odchýlky, kde bola snaha o zlepšenie v zmysle rozdelenia profilu a výpočtu na niekoľko samostatných častí – táto verzia bola uvedená verejne a je možné sa o nej dozvedieť viac v [28].

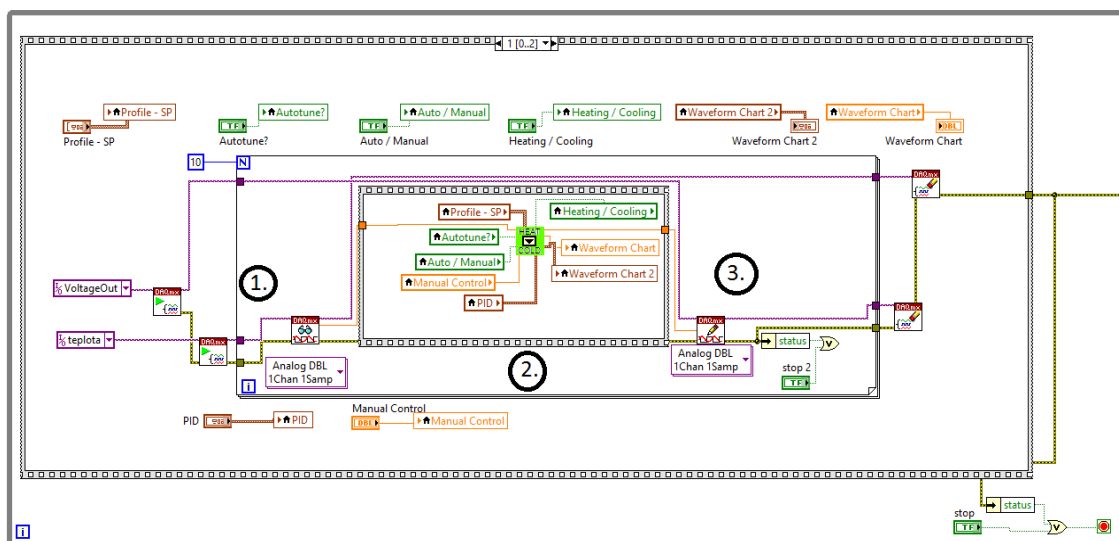
V ďalšej verzii boli oddelené časti pre nastavovanie profilu, konštánt pre PID regulátor a pod. od zobrazovacej časti, ktorá sa oproti prvej verzii zmenila v tom zmysle, že bola zoštíhľená a užívateľsky priateľnejšia. Tlačidlá na prechod medzi chladením a vyhrievaním či zapnutie, resp. vypnutie automatickej regulácie boli vynechané, keďže prechod medzi vyhrievaním a následným chladením je riešený automaticky.

4.1.3 Hlavný program

Po stručnom oboznámení sa s predným panelom, na ktorý sa bude operátor pozerat' najčastejšie, predstavíme blokový diagram, teda samotný kód hlavného programu.

Program bol navrhnutý ako stavový automat, vďaka čomu je možné program ľahko ďalej rozširovať o ďalšie moduly či ďalšie spracovanie signálov z už existujúcich modulov. Paralelné spracovanie úloh na použitých zariadeniach nie je možné, preto je nutné program vykonávať sekvenčne. Pretože podprogramy, ktoré sa starajú o výpočet

tlaku a sledovanie množstva kyslíka sú veľmi jednoduché, nebudeme sa nimi zaoberať podrobne.



Obrázok 17: Hlavný program – PID

Prejdime teda na program, ktorý obsluhuje navrhnutý regulátor (PID.vi) – na prvý pohľad nejde o úplne jednoduchý systém, avšak jeho princíp je veľmi jednoduchý.

Prvá časť programu (1.) sa stará o počiatočnú inicializáciu meracej karty a načítanie aktuálnej hodnoty zo snímača teploty. Vďaka zaisteniu „data flow“, teda že tok programu sa vykonáva v smere zľava doprava, je možné synchronizovať úlohy na meracej karte, a teda je možné čítať aj zapisovať súčasne.

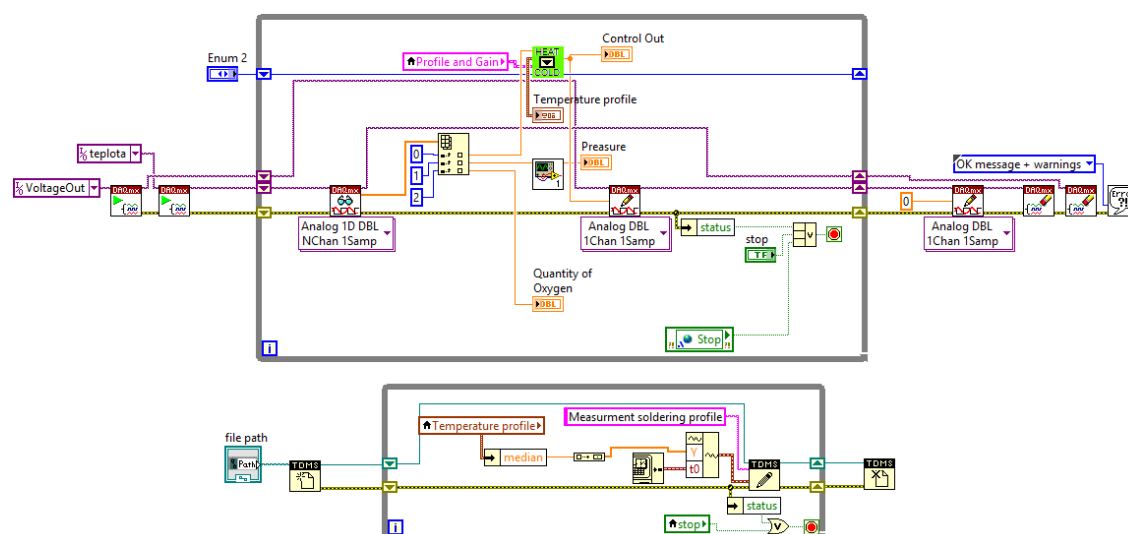
V druhej časti (2.) prichádza na rad samotný proces regulácie, teda navrhnutý podprogram (*subVI*), v ktorom sa nachádza algoritmus regulátora a podrobnejšie bude prebrať neskôr. Vstupy a výstupy boli riešené cez lokálne premenné (*local variable*) a predstavujú ovládacie a indikačné prvky. Lokálne premenné použité byť nemuseli, avšak v pláne bolo pridať aj ukladanie do databázy, kde by boli znova využité.

Tretia časť (3.) zabezpečuje samotný zápis požadovaných dát na jeden, prípadne viac, analógových výstupov karty, a vymazanie oboch úloh (*tasks*) z pamäte. Vymazanie bolo nutné, aby sa predišlo zbytočným chybám, preto je lepšie daný cyklus ukončiť korektne.

Opäť bola vyššie popísaná prvá verzia návrhu, ktorá bola odskúšaná experimentálne, ale pretože program bol vyvíjaný aj ďalej a prešiel, ako už bolo spomenuté, zmenami, uvedme podstatné zmeny oproti prvej verzii.

Druhá verzia programu bola navrhnutá tak, aby mohol byť profil rozdelený do viacerých častí. Podobným spôsobom sú riešené aj regulátory v praxi. Vnútorňa štruktúra bola mierne pozmenená, ako bolo uvedené v [28].

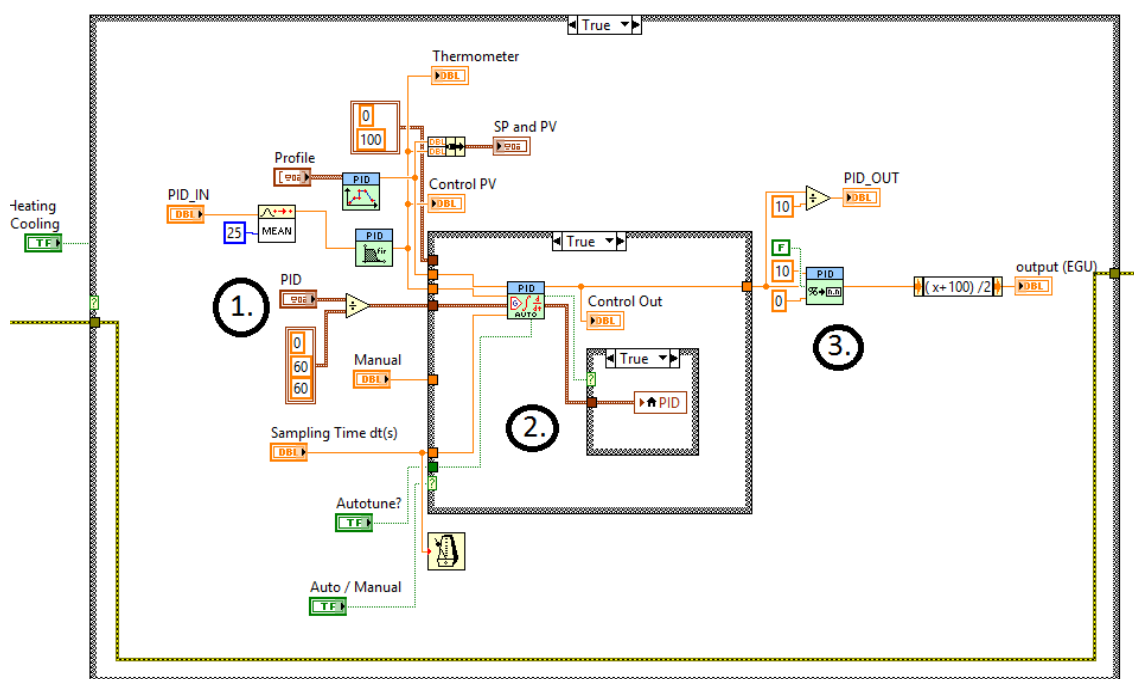
V poslednej verzii bola architektúra „prekopaná“ od začiatku a koncept stavového automatu bol nahradený kvázi paralelnou štruktúrou. Pod pojmom „kvázi paralelná štruktúra“ máme na mysli úplne synchronný zber dát, ktoré sa posielajú po sériovej linke (USB) do PC na spracovanie. Ušetríme čas a výkon potrebný na spracovanie a ďalšou výhodou je plynulý výstup, teda nie impulzný, ako bol riešený doteraz. Impulzný výstup bol dôsledkom konceptu stavového automatu, takže bola docielená ešte vyššia účinnosť regulátora z hľadiska softvérového návrhu (Obrázok 18). Pribudla možnosť ukladanie dát do súboru.



Obrázok 18: Architektúra – posledná verzia

4.1.4 Výpočet regulačnej odchýlky

Algoritmus pre výpočet regulačnej odchýlky, a teda jadro nášho regulátora môžeme vidieť na Obrázok 19. Podprogram je rozdelený na dve časti, a to reguláciu vyhrievania a PWM reguláciu chladenia, chladenie sa však zatiaľ ovláda manuálne (z časových dôvodov). Rozobratá bude teda najprv časť určená pre vyhrievanie na požadovanú teplotu. Opäť je možné si všimnúť rozdelenie na tri oblasti ako na predchádzajúcom obrázku.



Obrázok 19: Regulačný algoritmus – PID

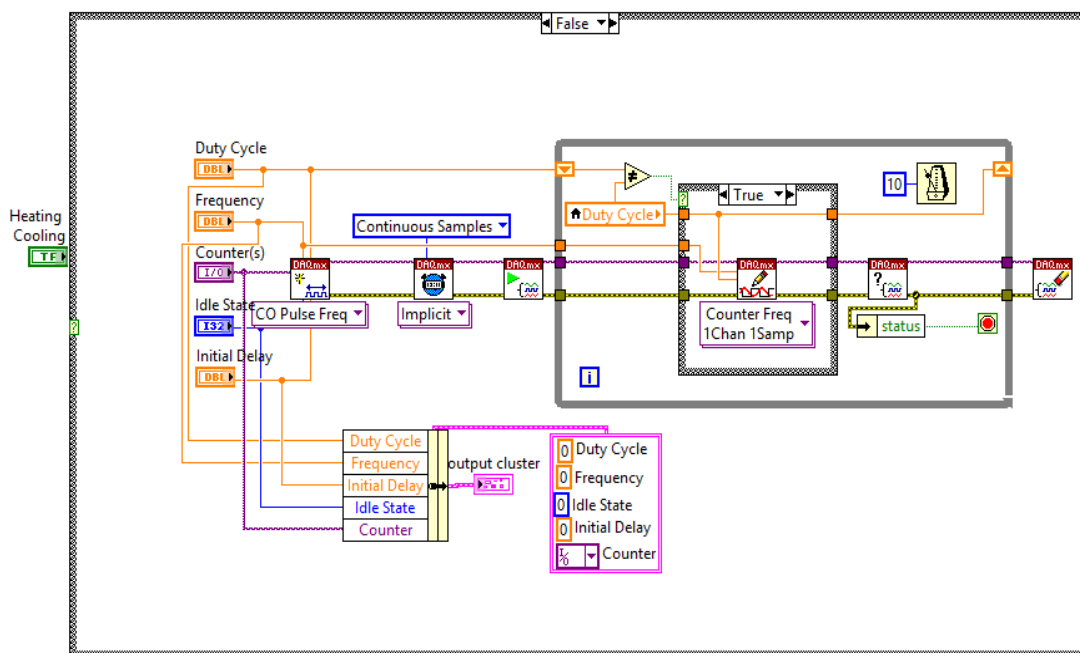
Prvá časť (1.) reprezentuje vstupné hodnoty, ktoré regulátor potrebuje, aby správne pracoval, nevyhnutné sú teda SP a PV. Vstupná hodnota so spätnej väzby, teda PV prechádza cez medianový filter a PID vstupný filter, ktorý reprezentuje filter typu dolný priepust. Takto sa zabráni vstupnému šumu a hodnoty v grafe sa nebudú príliš rozbiehať. O správne hodnoty SP sa postará *PID Setpoint Profile.vi*. Pre úplnosť doplníme, že výstupný rozsah regulátora bol 0 až 100, čo bolo nutné ošetriť.

V druhej časti (2.) vidíme už samotný *PID Autotuning.vi*, ktorý vstupné hodnoty spracuje a na základe nami zadaného počtu iterácií vypočíta vhodné parametre K_c , T_i a T_d na základe Ziegler-Nicholsovej metódy.

Výstupná časť, ktorá sa prezentuje na obrázku, (3.) už iba prevádza výstup regulátora na výstupné jednotky a odtiaľ berieme MV (*Measurement Value*). Výstup regulátora sa musí ešte ošetriť, zvolené bolo delenie hodnotou 10, aby mohol mať regulátor väčšiu presnosť. Tento nedostatok je spôsobený tým, že meracia karta nie je schopná poskytnúť vyššiu napäťovú úroveň ako 10 V, teda 100 percent. Pôvodne bol tento problém riešený upravením rozsahu regulátora na 0 – 10, resp. -10 – 10. Nakoniec však bolo zvolené, že na výstup zaradíme zosilňovač so ziskom 1,0, čím problém ošetríme po hardvérovej stránke.

4.1.5 PWM regulácia pre okruh chladenia

Pre riadenie chladenia, ktorým bol v našom prípade okruh vodného chladenia, bol použitý integrovaný čítač, na ktorom bola postavená jednoduchá PWM regulácia. Pre úplnosť dodávame, že na ovládanie je treba koncový stupeň, ktorý čerpadlu dodá potrebný výkon. PWM reguláciu môžeme vidieť na Obrázok 20.



Obrázok 20: PWM regulácia

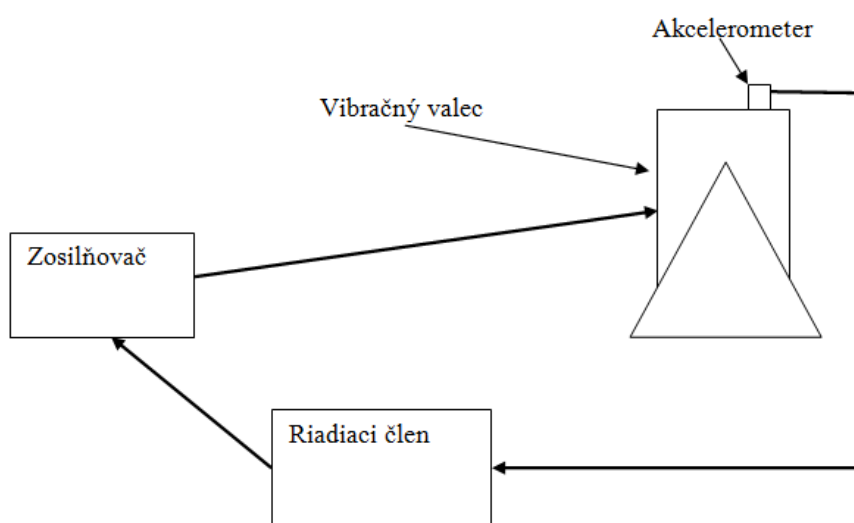
Program kontinuálne vysiela impulzy s vopred určenou frekvenciou. Regulácia spočíva v zmene dĺžky impulzu (*Duty Cycle*), ktorý ako jediný je možné meniť počas behu programu.

Pred pripravený *cluster*, ktorý môže zmiast' (v spodnej časti obrázka), slúži ako príprava na ďalšie spracovanie či ukladanie hodnôt do databázy.[29]

4.1.6 Koncept riadenia pre malý vibračný valec

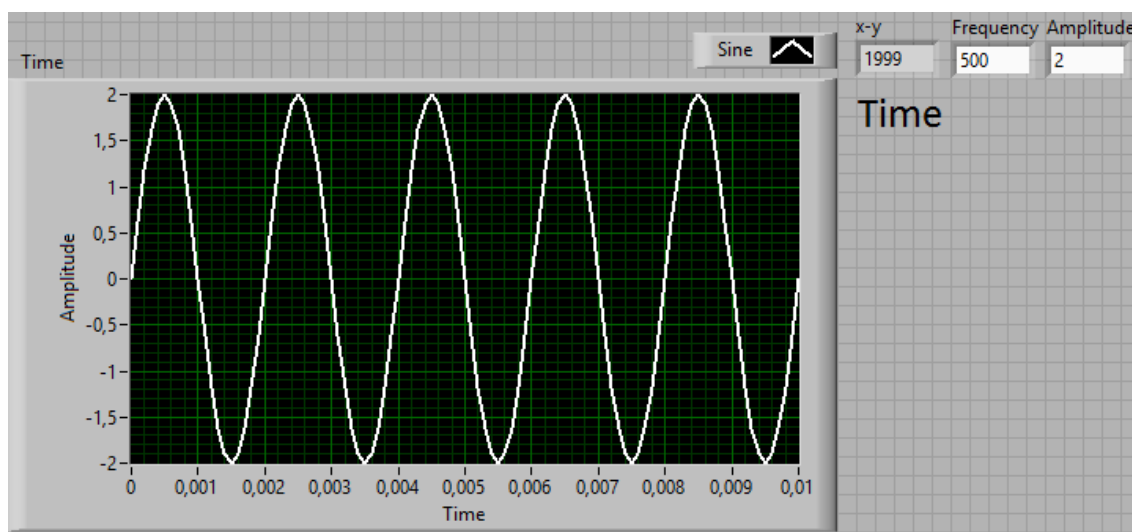
V rámci riešenia semestrálneho projektu bolo nutné rozobrať aj návrh riadenia pre vibračnú stolicu. Riadenie – povedané v skratke – spočíva v snahe udržať amplitúdu na vibračnej stolici na požadovaných hodnotách frekvencie, ktoré sa postupne utlmujú a je potrebné tieto hodnoty korigovať.

Na tieto účely bolo použité zariadenie CompactDAQ 9174 s modulmi NI 9234 a NI 9263. Modul 9234 bol využitý ako analógový vstup pre dáta z akcelerometra, pracuje so vzorkovacou frekvenciou 51,2 kHz/s, čo potrebám vibračnej stolice, ktorej riadiaci signál sa pohybuje v pásme od 20 Hz do 2000 Hz, postačuje. Ako výstup bol použitý modul 9263, ktorý poskytuje 4 analógové výstupy, z ktorých je schopný dodávať signál s maximálnou frekvenciou 100 kHz pre jeden kanál, pri použití viacerých kanálov maximálna možná frekvencia výstupného signálu klesá.



Obrázok 21: Princíp riadenia

Vyššie vidíme (Obrázok 21) principiálnu schému, ako by cyklus riadenia mal prebiehať. Problém však nastáva v možnostiach hardvéru. Pri frekvencii 2 kHz, na ktorých kmitá vibračný valec, sa signál mení každých 50 ms, čo znamená, že pre správnu a dostatočne rýchlu reguláciu potrebujeme, aby sa program vykonal ideálne pod 100 ms a zber dát aj generovanie bežali paralelne. Tu nastáva problém tak na strane hardvéru, ako aj na strane softvéru, pretože zápis, načítanie a výpočet spektrálnej hustoty, či korigovanie výstupného signálu, trvá na PC zhruba 2 s.

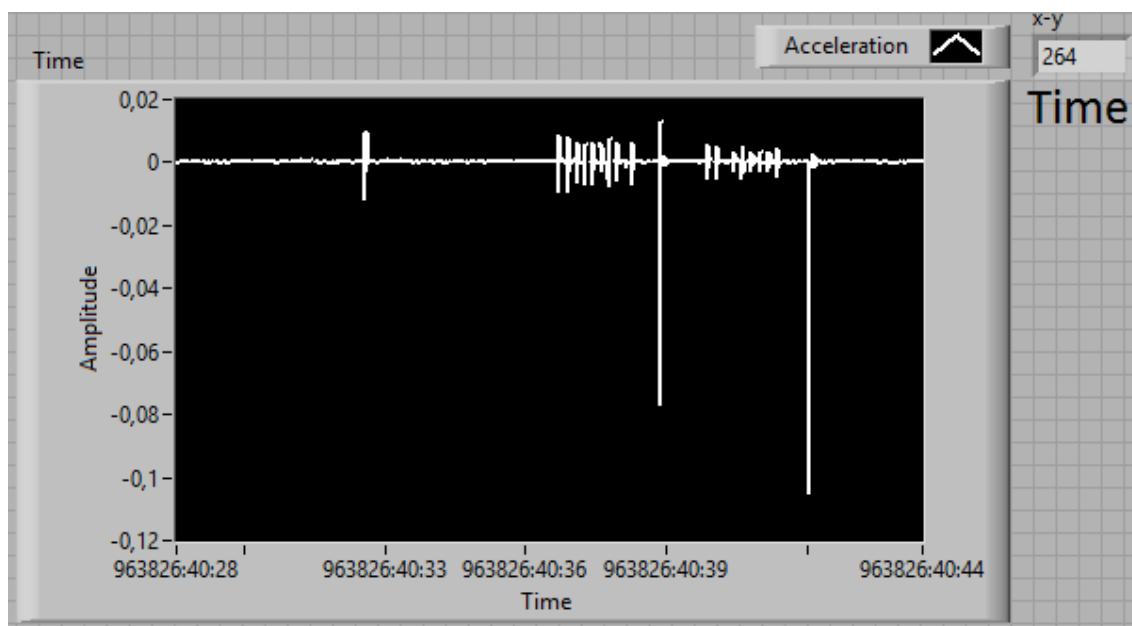


Obrázok 22: Dĺžka cyklu pri meraní, spracovaní a úprave

Zistenie dopĺňujeme a prikladáme citáciu z dokumentácie o vibračnom valci, ktorý navrhovali v spoločnosti NI: „Dĺžka cyklu: čas potrebný na detegovanie zmien na vibračnej stolici, reakciu a správu riadeného signálu. Vibračná stolica reaguje rýchlejšie, keď je doba cyklu menšia. Dĺžka cyklu závisí na použítom hardware a komplexnosti software. Dĺžka cyklu väčšiny vibračných stolíc v praxi je 100 ms. S použitím CompactRIO platformy môžete urobiť 100 ms dĺžku cyklu (Time loop).“ [14]

Je teda jasné, že realizácia riadenia pre vibračný valec na platforme CompactDAQ je možná, avšak nie reálne použiteľná pre potreby tejto práce. Bolo nutné využiť platformu CompactRIO s obvodom FPGA, pre rýchle a paralelné spracovanie riadiacich signálov.

Na platforme CompactDAQ bolo možné realizovať načítanie signálu z akcelerometra, platforma zvládne spoľahlivo zachytávať signály do cca 1 kHz. V prípade signálov s vyššou frekvenciou je nutná softvérová úprava a záleží na konkrétnej aplikácii. Experimentálnym meraním bolo zistené, že zber údajov z akcelerometra trvá cca 250 ms.



Obrázok 23: Dĺžka cyklu pri samotnom meraní

Meranie dĺžky cyklu bolo vykonané tak, že bol odmeraný čas na začiatku cyklu, hodnota bola nahratá do posuvného registra a po prechode celého cyklu sa opäť načítala hodnota času. V ďalšom cykle sa od seba hodnoty odčítali, vzniknutý rozdiel v milisekundách zodpovedá dĺžke trvania jedného cyklu programu. V obrázku je zobrazený v pravom hornom rohu.

4.2 Požiadavky na program

Ako bolo uvedené v predchádzajúcej kapitole, riadenie pre vibračnú stolicu je na platforme CompactDAQ možné realizovať iba pre obmedzené pásmo frekvencií, ktoré nepostačuje pre splnenie normy IPC TM-60, ako sme uviedli v kapitole 3. Bolo teda

nutné prejsť na výkonnejší hardvér, preto bola zvolená platforma CompactRIO, keďže bola k dispozícii, spolu s vývojovým prostredím LabVIEW.

Základné požiadavky sú formulované v zadaní práce, avšak pre pripomenutie ich uvádzame znova:

- Riadenie pre malú vibračnú stolicu
- Spracovanie dát (výpočet rýchlosti, posunutia a výkonového spektra)
- Záznam nameraných dát do súboru
- Export aktuálne nameraných dát do programu Microsoft Excel
- Stručný manuál pre obsluhu

Program bol navrhnutý tak, aby nedochádzalo k strate informácií a zároveň bola snaha o optimalizováciu pre danú platformu. Pre lepšie spracovanie bol program rozdelený na tri úrovne, ako ukazuje Tabuľka 1: Rozdelenie programu.

FPGA	Real-Time OS	Host-PC
Pamäť typu FIFO a zmena dátových typov.	Riadenie pre rozmetaný sínusový signál. Zasielanie údajov na Host-PC.	Spracovanie a záznam nameraných údajov. Vytvorenie <i>sweep sine</i> paternu.

Tabuľka 1: Rozdelenie programu

Ako vidno z tabuľky, program je pomerne komplexný a pozostáva teda z troch častí, ktoré obsahujú ďalšie podprogramy, bez ktorých by neboli schopné spracovania. Veľkou výhodou platformy CompactRIO je spojenie FPGA obvodu s ARM procesorom, na ktorom beží operačný systém reálneho času [14]. Vďaka týmto špecifickým vlastnostiam je platforma vhodná tak pre riadenie, ako aj pre rýchle spracovanie veľkého množstva údajov v reálnom čase.

4.3 Návrh programu

Program bol navrhnutý s ohľadom na odporúčané techniky, ktoré sa nachádzajú v príručke vývojára pre systém CompactRIO (*CompactRIO Developer's Guide*) [14], a vlastné skúsenosti autora.

Ako bolo uvedené v predchádzajúcej kapitole, program je rozdelený na tri „samostatné“ časti, bol však navrhnutý ako modulárna štruktúra, takže jednotlivé moduly je možné využiť aj samostatne v ďalších projektoch. Ako predloha a ukázkový program bol okrem dostupných príkladov veľmi nápomocný projekt návrhu vibračnej stolice v prostredí LabVIEW, ktorý je voľne dostupný. Popíšme teda samotné hlavné časti programu, a to I/O (FPGA).vi, Main (RT).vi a Main (Host-PC).vi.

4.3.1 FPGA.vi

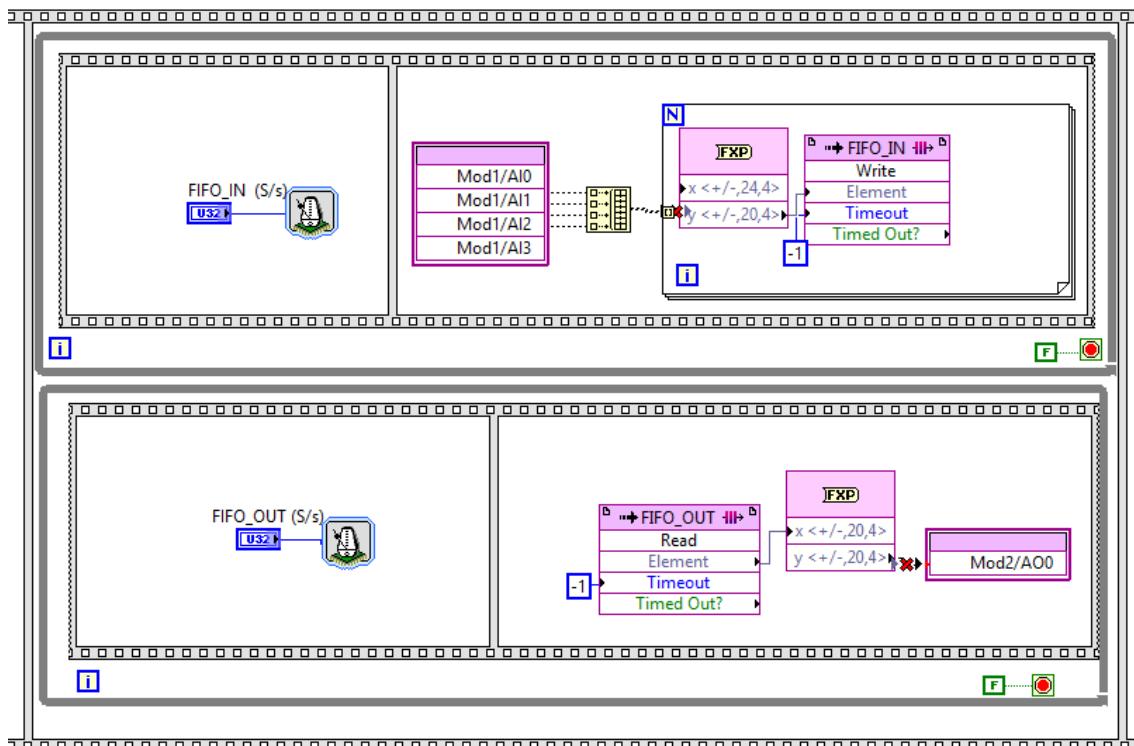
Pre spresnenie uvedme, že využívame FPGA obvod firmy Xilinx, model Spartan 6 LX150. Na tomto beží podprogram I/O (FPGA).vi, ktorý okrem toho v jednoduchosti slúži ako „buffer“, teda pamäť typu FIFO. Na Obrázok 24 je možné vidieť buffer realizovaný priamo na FPGA čipe, ktorý bol využitý pre načítanie a posielanie dát z fyzických modulov. Rýchlosť načítania, resp. odosielania je možné riadiť na základe premennej FIFO_IN/FIFO_OUT, do ktorej sa zapíše ako často má cyklus *while* prebehnúť. Realizujeme týmto spôsobom vzorkovaciu frekvenciu, aby sme predchádzali prevzorkovaniu (*oversampling*) či podvzorkovaniu (*undersampling*). Číslo udávame v mikrosekundách, takže napríklad $100\ \mu\text{s} = 10\ \text{kHz}$ vzorkovacia frekvencia. Aby nedochádzalo k strate informácie, musíme dodržiavať Nyquistovu podmienku [30]:

$$f_s = \frac{1}{T_s} \geq 2f_m \quad (5.1)$$

f_s – vzorkovacia frekvencia

T_s – perióda vzorkovania

f_m – maximálna frekvencia vzorkovaného signálu



Obrázok 24: FPGA buffer

FPGA obvod sme využili hlavne ako buffer a prevodník dátových typov. Pretože využívame moduly v kalibrovanom móde, je nutné na vstupy privádzať hodnoty v dátovom type FXP (20,4), teda s pevnou desatinnou čiarkou. V tomto type ich rovnako sníma na vstupoch. Bez príslušnej konverzie by sme neboli schopní na výstup posielat' korektný signál.

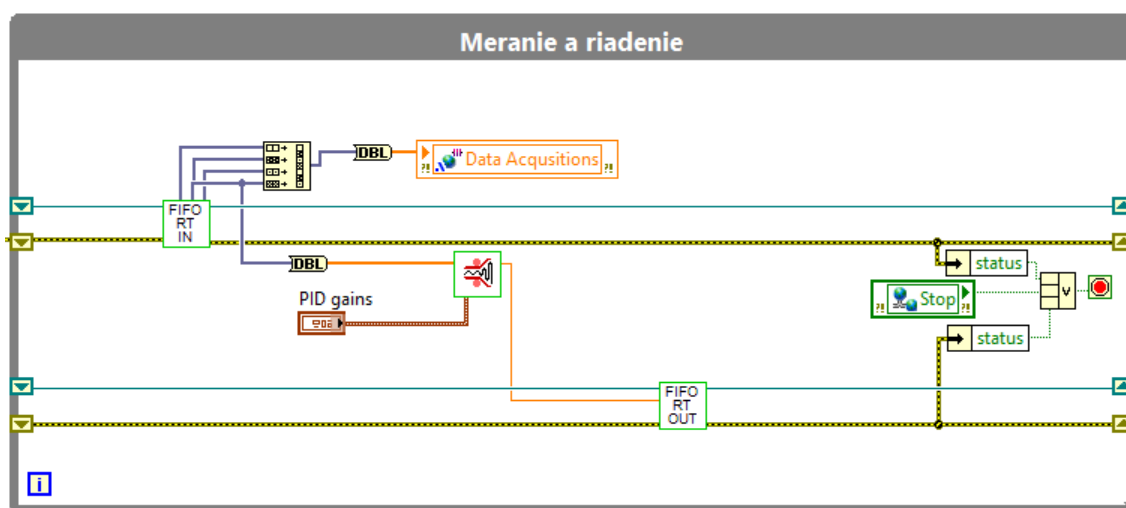
Pamäte typu FIFO boli nastavené na veľkosť 1024 vzoriek pre výstupný signál a 2048 pre vstupný signál. Využívame jeden FIFO na zber dát zo všetkých vstupov súčasne, pretože k dispozícii ich máme fyzicky iba tri, z tohto dôvodu aj navýšenie veľkosti pamäte pre vstupné senzory. Cykly bežia nezávisle od seba, a teda zber dát aj generovanie signálu prebieha úplne paralelne.

Main (RT).vi

V tejto časti programu sa venujeme samotnému riadeniu a komunikácii s Host-PC, na ktorom beží posledná časť programu. Rozobratá bude neskôr.

V tejto časti bol návrh programu kritický, keďže riadenie je deterministický proces a bolo nutné oddeliť riadenie od zasielania dát. Program po úvodnej inicializácii beží v dvoch samostatných *while* cykloch, oba pritom bežia maximálnou možnou rýchlosťou. Rozoberieme si ich postupne...

Po úvodnej inicializácii, v ktorej aktivujeme zdieľané premenné (*Shared Variable*), nadviažeme komunikáciu s FPGA a určíme vzorkovacie frekvencie, prechádza program do dvoch paralelne bežiacich cyklov, pričom vyššiu prioritu má, samozrejme, riadiaci cyklus (Obrázok 25).



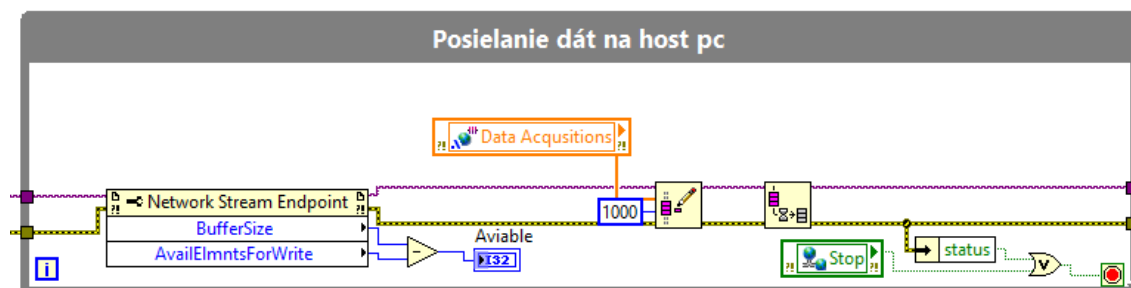
Obrázok 25: Riadiaci cyklus

Môžeme vidieť, že program pozostáva z troch podprogramov – ide o načítanie vstupných údajov z FIFO pamäte, ktorá obsluhuje fyzické vstupy, následné spracovanie a vyhodnotenie odchýlky od požadovanej úrovne a samotný zápis upravených údajov do FIFO pamäte obsluhujúcej výstup. Ako v prípade vstupu, aj výstup môže byť realizovaný na niekoľko výstupných fyzických kanálov.

V pravej časti cyklu sa nachádza už len ochranný algoritmus, ktorý sleduje či nedošlo k chybe pri vykonávaní programu, prípadne či operátor nestlačil tlačidlo STOP v hlavnom programe.

V ďalšom cykle sa po nadviazaní komunikácie s aplikáciou bežiacou na Host-PC už vytvorí nosný kanál, cez ktorý sa automaticky posielajú aktuálne namerané hodnoty

zo všetkých akcelerometrov priamo na Host-PC, kde prebieha ich ďalšie spracovanie (Obrázok 26).



Obrázok 26: Posielanie dát na Host-PC

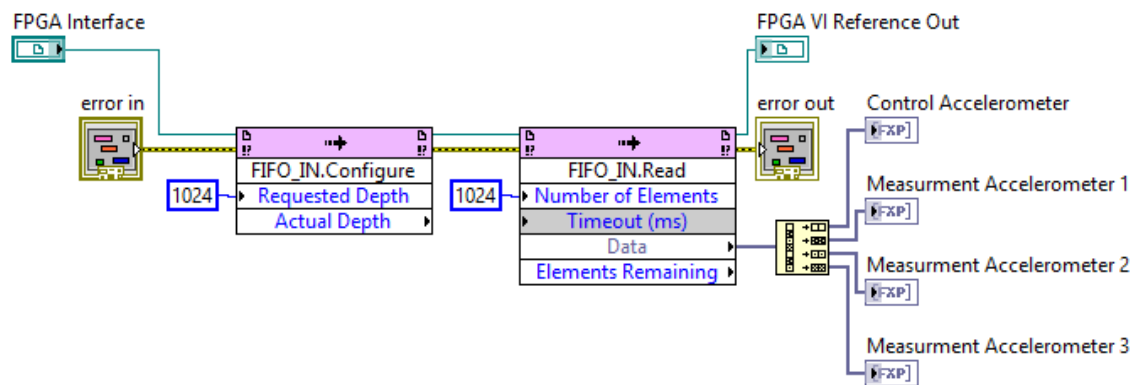
Možností, ako komunikovať medzi jednotlivými podprogramami (*SubVI*), ktoré sa nachádzajú na rozličných platformách, hardvéri a podobne, je v prostredí LabVIEW niekoľko. Zvolené prostriedky boli „sieťový prenos“ (*Network Stream*) a „zdieľané premenné“ (*Shared Variable*). Ďalšími metódami sa táto práca nezaoberá. Za zmienku stojí, že pre komunikáciu medzi cyklami bola využitá jedna premenná, na obrázku ju môžeme vidieť pod názvom *Data Acquisitions*.

Sieťový prenos bol zvolený preto, že ide o deterministický bezstratový prenos sieťou, navrhnutý na neustále posielanie veľkého množstva dát. Je možné ho využiť aj na posielanie príkazov. Na posielanie príkazov však v tomto projekte poslúžili zdieľané premenné (*Shared variable*), ktoré realizujú prenos príkazov z Host-PC na RT a späť, vrátane chybových hlásení a okamžitého vypnutia programu v prípade, že dôjde k hazardnému stavu a mohlo by dôjsť k poškodeniu či dokonca zničeniu zariadení.

Pre prípad poruchy sledujeme maximálne preťaženie vibračnej stoličky a maximálne napätie, ktorým vibračný valec cez zosilňovač budíme. Oba faktory sú však závislé od nastavení operátora. Predný panel, teda to čo vidí operátor, neuvádzame z toho dôvodu, že I/O (FPGA).vi ani Main (RT).vi neobsahujú prispôbený predný panel a slúžia ako doplnkové programy, ktorých úloha je v spracovaní signálu.

Komunikácia medzi RT a FPGA

Pre úplnosť ukážme komunikáciu medzi Real-Time OS a FPGA obvodom (Obrázok 27). Sledujte obrázok zľava – prvý blok reprezentuje počiatočné nastavenie veľkosti FIFO registra, týmto blokom je možné nastaviť väčšiu pamäť v prípade potreby.



Obrázok 27: Načítanie dát z FIFO pamäte

Veľkosť pamäte bola nastavená na 1024 vzoriek, keďže FIFO obsahuje informácie zo všetkých štyroch akcelerometrov a na jeden akcelerometr pripadá presne 256 vzoriek. Aby sme oddelili vzorky, rozložíme pole na 4 samostatné polia, kde prvé pole obsahuje vzorky (0,N,2N,...), druhé pole (1,N+1,2N+1,...) atď.

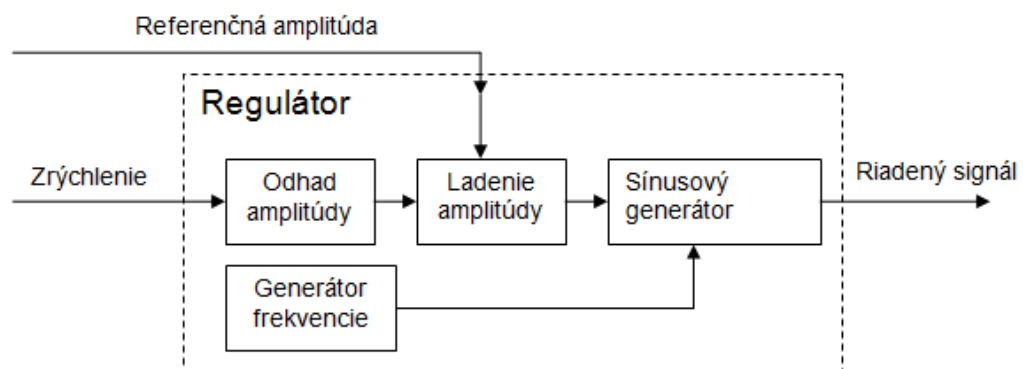
Veľmi podobná štruktúra bola použitá aj pre výstupný FIFO register. Na miesto načítavania údajov však na vstup výstupného FIFO registra privádzame výstup funkčného generátora sínusu, na ktorom upravujeme amplitúdu.

Processing.vi

Časť regulácie je kritická, pretože regulátor sa môže dostať do nestabilného stavu, teda namiesto regulátora vznikne oscilátor. Ako bolo popísané v kapitole 2.1., poznáme reguláciu typu *feedback* alebo *feedforward*, či kombináciou oboch. Toto rozdelenie je samozrejme veľmi hrubé, táto práca sa však nevenuje problematike regulácie do detailu.

V najvšeobecnejšom prípade je možné sledovať výkon na danej frekvencii a na základe tejto informácie je možné upravovať amplitúdu. Využijeme DFT, ktorá je však náročná na spracovanie. Riadenie na základe podobného princípu je možné uplatniť pri riadení náhodných vibrácií, ako popisuje [31].

Pre lepšiu ilustráciu, na Obrázok 28 vidíme princíp, ako bolo k riadeniu, teda korigovaniu signálu pristupované. Táto schéma však platí iba pre náš prípad, v prípade iných architektúr sa schéma a jednotlivé bloky môžu líšiť.



Obrázok 28: Regulátor pre vibračnú stolicu

Ako regulačný algoritmus bol zvolený typ *feedback* a konkrétne v prvom priblížení bola použitá iteračná rovnica:

$$\begin{cases} A_{i+1} = A_i \times \frac{K+1/r}{K+r} & r \leq 1 \\ A_{i+1} = A_i \times \frac{K+1}{K+r} & r > 1 \end{cases} \quad (5.2)$$

kde A_{i+1} je nová amplitúda

A_i je amplitúda z predchádzajúcej iterácie

r je pomer požadovanej k aktuálnej amplitúde

K je faktor konvergenzie.

Malá hodnota K vedie k rýchlejšej konvergencii [14]. Problém, ktorý nastal pri tejto rovnici v znení, v akom bola implementovaná v LabVIEW, bol ten, že pokiaľ je súčasná amplitúda príliš malá, teda referenčná hodnota je od aktuálnej vzdialená, a dĺžka konverencie trvá niekoľko sekúnd, rovnica iteruje takmer do nekonečna a nestíha pri presiahnutí referenčnej úrovne dostatočne rýchlo klesať späť. Problém konverencie do nekonečna bol vyriešený pomerne rýchlo, regulačný vzťah však naďalej vykazuje silnú nestabilitu, pracuje ako oscilátor.

Adaptívne filtre

Rozhodol som sa teda implementovať reguláciu metódou *feedforward* s využitím adaptívnych filtrov. Na tejto metóde sú postavené napr. testy *road simulation* a pod.

Avšak pri týchto metódach je opäť problém so stabilitou. Použité sú nerekurzívne FIR filtre, adaptabilný algoritmus ale nie je vždy stabilný. Opäť sme narazili na problém so stabilitou, metóda je však podľa odporúčania praxe vhodná.

Implementácia adaptívnych filtrov nebola úspešná. Metóda vyžaduje hlbšie znalosti z oblasti číslicového spracovania signálov a rekonštrukcie signálov.

Vlastné návrhy

V ďalšom priblížení bol implementovaný jednoduchý algoritmus, ktorý sleduje referenčnú hodnotu, teda amplitúdu ako funkciu frekvencie. Táto hodnota je porovnávaná s aktuálnou odozvou a podľa výsledku porovnania je buď aktuálna riadiaca amplitúda inkrementovaná o hodnotu 0,0001, alebo naopak je znižovaná o hodnotu 0,0001. Pre lepšie pochopenie uvádzam jednoduchý kód reprezentujúci tento „integrátor/derivátor“:

```
Int 32 y //Aktuálna hodnota
```

```
Int32 x //Referencia
```

```
Int 32 z //Riadiaca amplitúda
```

```
If y < x
```

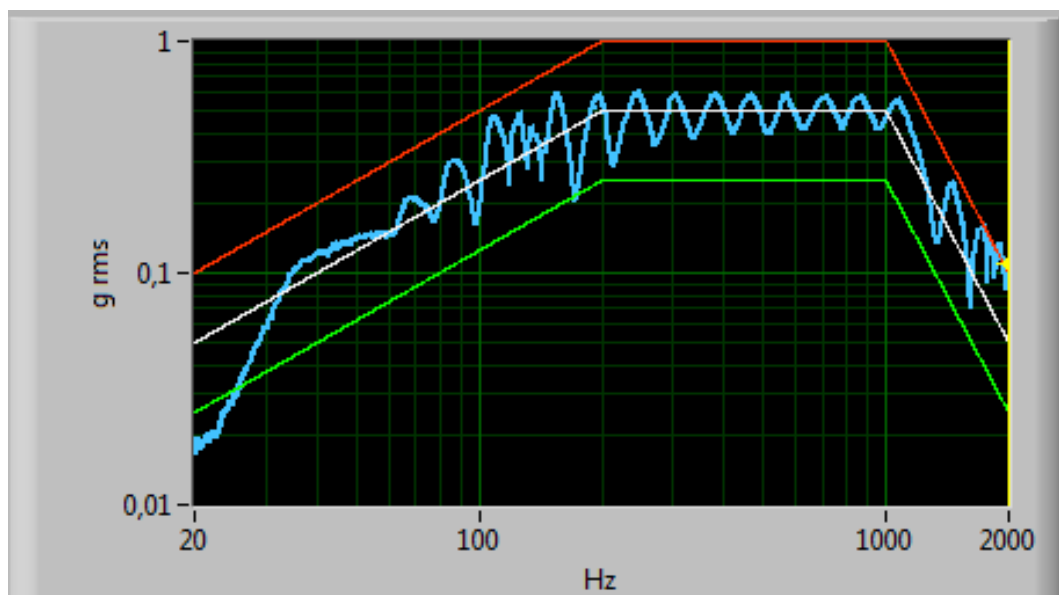
```
    If z > 3
```

```

        z = 3;
    else
        z += 0,0001;
    else
    If z < 0
        z = 0;
    else
        z -= 0,0001;
    End;

```

Výsledné riadenie dosiahnuté pomocou takéhoto algoritmu, ktorý bol experimentálne ešte ladený, je vidieť na Obrázok 29.

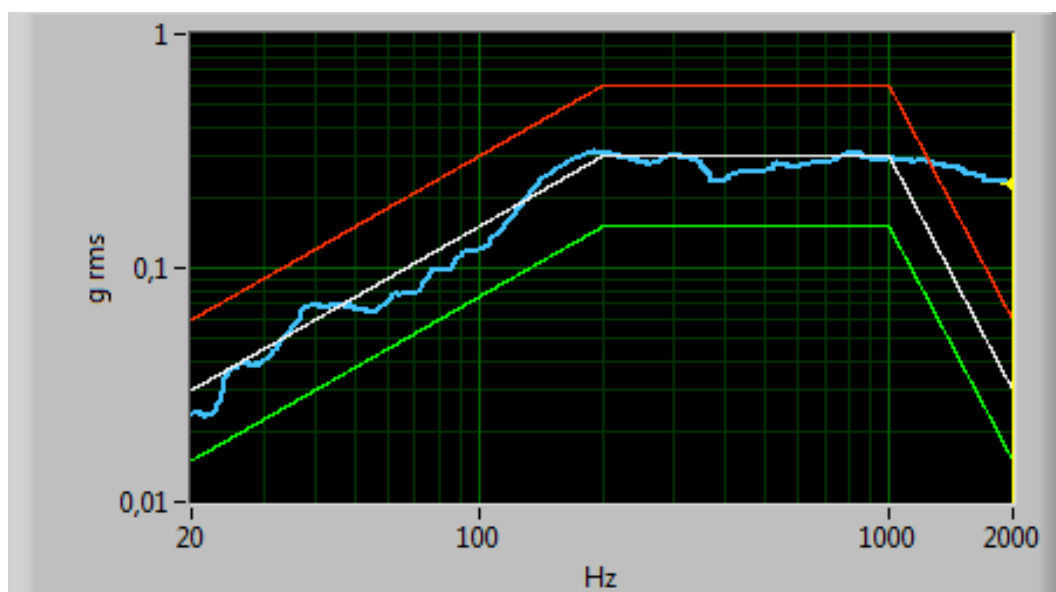


Obrázok 29: P regulátor – návrh

Samozrejme, regulátor, ktorý pracuje v takomto režime nie je v praxi použiteľný. Výsledok uvádzam preto, že ide o návrh, ktorý bol realizovaný a oproti pôvodnej rovnici je zreteľne vidieť isté zlepšenie.

Pokračovaním v tomto návrhu je 5-bitový rozhodovací *integrátor/derivátor*, ktorý vychádza z prvotného návrhu *integrátora/derivátora* a bol postavený na myšlienke presnejšieho kroku na základe odhadu vzdialenosti medzi aktuálnou hodnotou a referenčnou hodnotou v reálnom čase. (Implementované testy nedopadli podľa očakávania, zlepšenie v oblasti roviny.)

Experimentálne bolo spozorované zlepšenie po zavedení „delay“, teda oneskorovacích členov, zatiaľ však iba „natvrdo“ vo forme časovača; pracujeme na implementácii oneskorovacieho člena v z transformácií, aby nebol spomalený samotný program. (Obrázok 30)



Obrázok 30: Integrátor/derivátor delay 10 ms

Predposledným návrhom je estimačná (estimácia – odhad) rovnica podobná tej, ako sme používali v prvom priblížení, ide však opäť o vlastný návrh, ktorý bol odvodený na základe predpokladu, že závislosť amplitúdy od frekvencie je nelineárna:

$$g_2 \begin{cases} g_2 = (k - 0,001) \times f_2 + g_1 & r \leq 1 \\ g_2 = (k + 0,002) \times f_2 + g_1 & r > 1 \end{cases} \quad (5.3)$$

kde r je opäť správnosť odhadu (ak $r = 1$, odhad je 100 %)

k je derivácia zrýchlenia podľa frekvencie

f_2 frekvencia v súčasnom bode

g_2 zrýchlenie v súčasnom bode

g_1 zrýchlenie z predchádzajúcej iterácie.

Rovnica bola implementovaná do prostredia LabVIEW, ale nebola odskúšaná. S veľkou pravdepodobnosťou by takisto došlo k pravidelným osciláciám, kmitom.

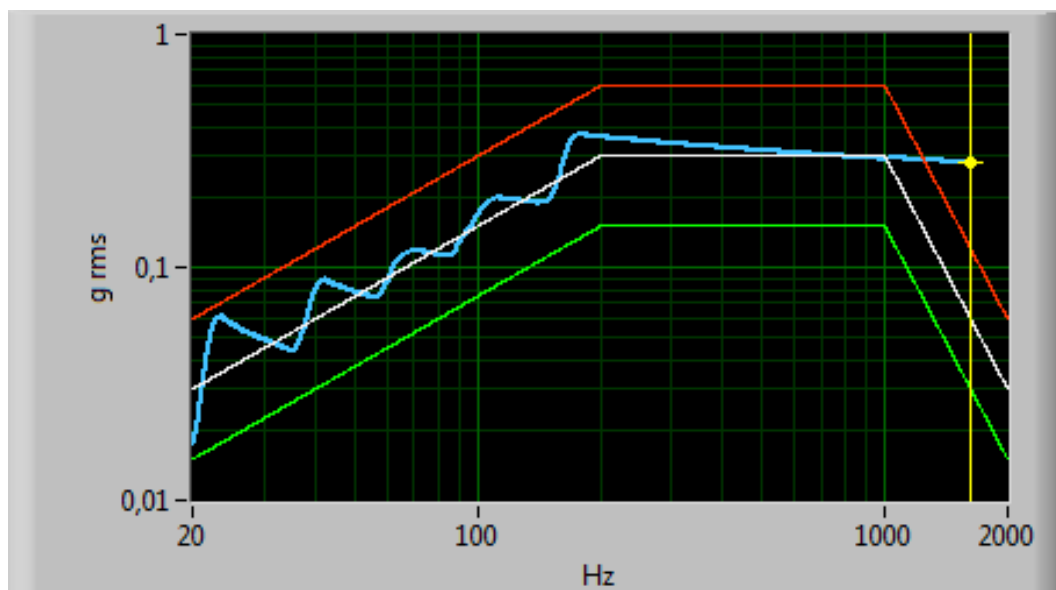
Posledným návrhom, ktorý však je možné použiť iba pre konkrétne rezonančné frekvencie, je – pre potlačenie rezonančných frekvencií môžeme do obvodu zaradiť filter typu pásmová zadrž, ktorý je možné ľahko implementovať digitálne.

PID regulácia

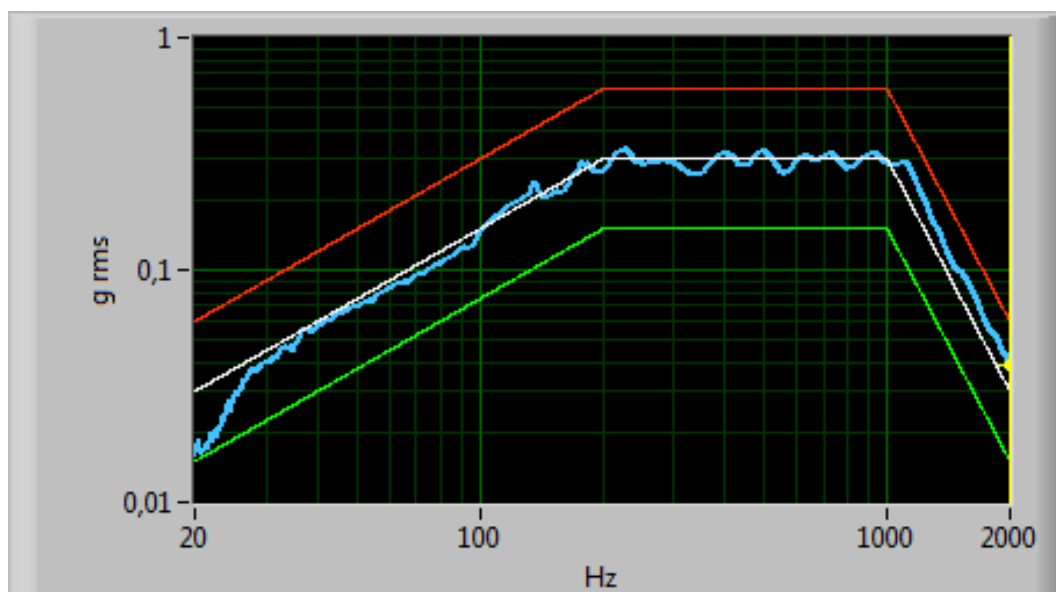
V projekte regulátora teploty pre spájkovací proces, ktorý bol rozobratý v kapitole 4, bol využitý najpoužívanejší typ priemyselného regulátora PID. Tento algoritmus bol vyskúšaný aj pre riadenie vibračnej stolice. Výsledky v prvom priblížení veľmi pripomínali vyššie navrhnutý P regulátor, ba dokonca horšie. Práve preto bola táto možnosť pomerne podceňovaná.

Po doporučení z praxe a niekoľkých testoch sme sa dopracovali k stabilnému stavu a regulácii, ktorá bola potrebná. Rozdiel medzi počiatočným a takmer konečným riešením je vidieť na obrázkoch nižšie. (Obrázok 31 a Obrázok 32)

Základný rozdiel medzi obrázkami je v použitých konštantách PID regulátora.



Obrázok 31: PID počiatočný stav



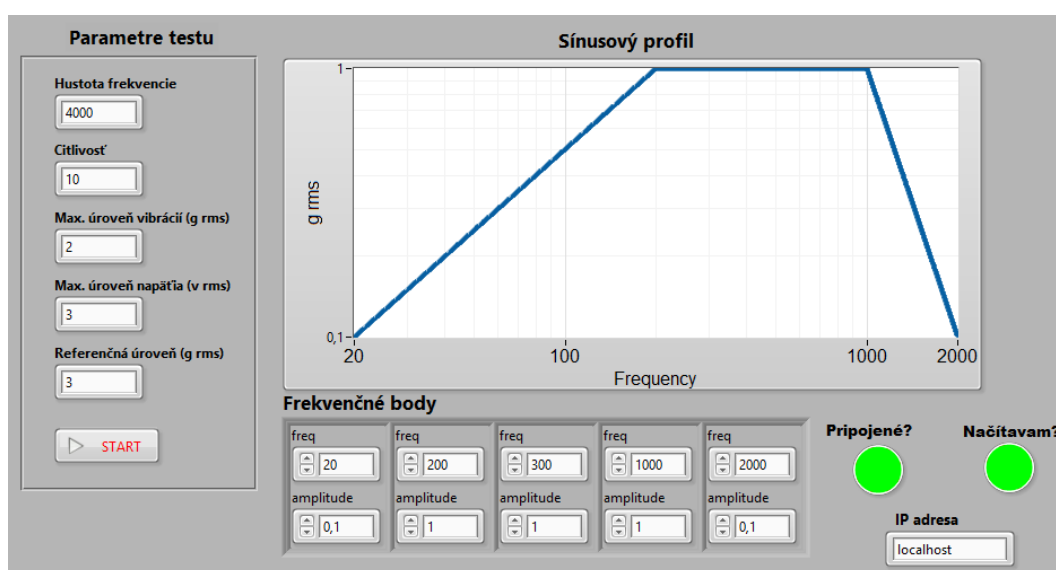
Obrázok 32: PID konečný stav

Z vyššie uvedených výsledkov je jasné, že PID regulátor vyhovuje požiadavkám a je schopný po správnom nastavení konštánt udržať požadovanú úroveň vibrácií.

4.3.2 Main (Host-PC).vi – predný panel

V návrhu programu bolo potrebné okrem riadenia a komunikácie navrhnuť samotné prostredie, ktoré bude užívateľský prístupné spolu s výsledným spracovaním a záznamom dát.

Nejde o kritickú časť programu, bolo však nutné jej prispôbiť našim potrebám. Keďže ide o najväčšiu časť programu, bude rozobratá postupne a začneme teda prednými panelmi jednotlivých sekcií, ku ktorým má užívateľ prístup.



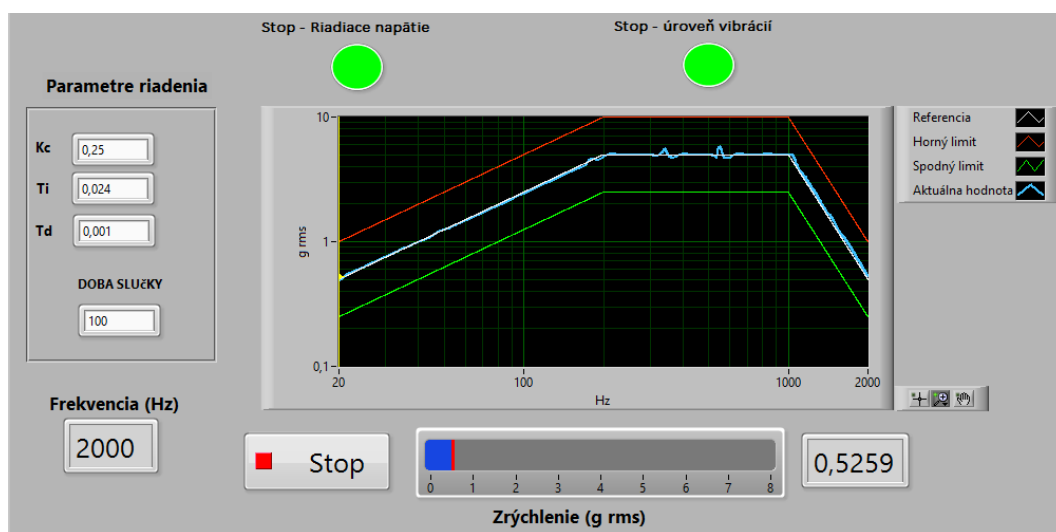
Obrázok 33: Predný panel – nastavenia

Ako je vidieť na obrázku, predný panel, ktorý operátor uvidí najprv, pôsobí jednoduchým dojmom a všetko podstatné je jasne vidieť. V ľavom rohu sa nachádzajú možnosti voľby parametrov testu, ako sú počet frekvenčných čiar, citlivosť riadiaceho akcelerometra, maximálna úroveň vibrácií, maximálne budiace napätie a, samozrejme, referenčná úroveň vibrácií, ktorou určujeme hranice nami zadaného spektra. Tlačidlo štart reprezentuje posun do ďalšej časti, a teda spúšťa samotné meranie.

V spodnej časti operátor nastaví profil podľa úrovne zrýchlenia v g pri danej frekvencii. Nastavený profil sa automaticky po spustení premietne do grafu, ktorý je umiestnený v strede s jedinou úlohou zobraziť nastavený profil. Zelené indikátory podávajú

informáciu o tom, či je nadviazané spojenie s embeded systémom, a teda či je možné spustiť test. V prípade, že zobrazujú červenú farbu spojenie nie je nadviazané a je treba skontrolovať spojenie. Pred spustením je nutné zadať IP adresu embeded systému a príslušný port, na ktorom bude komunikácia prebiehať.

Po spustení testu sa program automaticky prepne na ďalšiu časť, teda samotné testovanie (Obrázok 34).

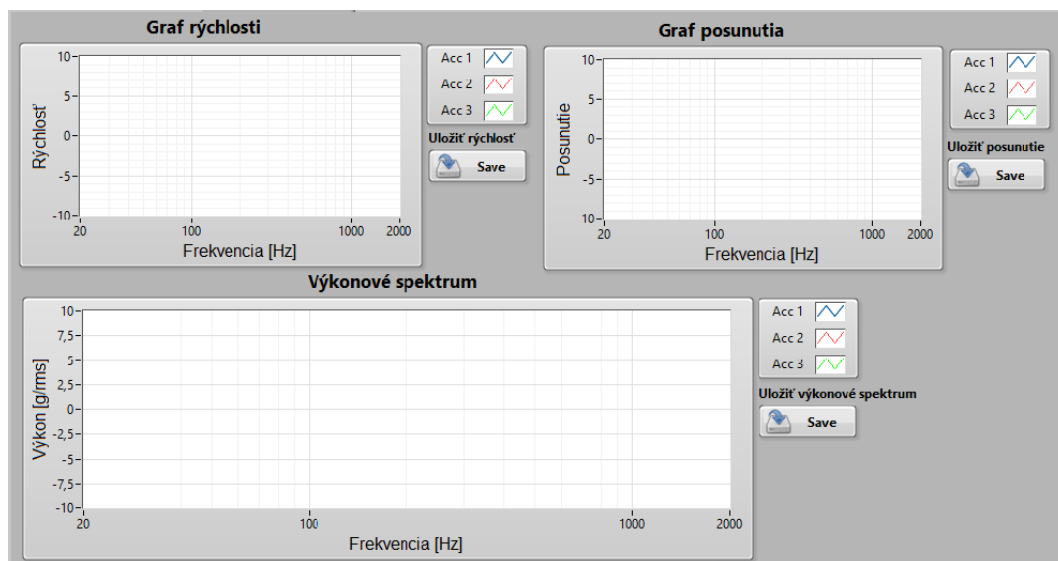


Obrázok 34: Predný panel – test

Samotný test prebieha automaticky, takže operátor už iba na proces dohliada. Frekvencia sínusového signálu je postupne zvyšovaná od 20 Hz do 2000 Hz, zároveň sa sleduje odozva systému a regulačný algoritmus popísaný vyššie sa stará o to, aby úroveň zrýchlenia prebiehala podľa vopred daného predpísaného dizajnu, teda ako bolo nastavené. Referenčný profil, ktorý program sleduje, prezentuje stredová modrá línia, horný a spodný limit je daný úrovňou referencie nastavenou v predchádzajúcom kroku. V ľavej časti sa nachádzajú ešte ďalšie možnosti nastavení, a to „K faktor“, ktorý ovplyvňuje rýchlosť konvergence riadiaceho algoritmu a dĺžku cyklu (*Loop time*), ktorým ovplyvňujeme ako rýchlo sa mení frekvencia – teda samotnú dĺžku testu.

Nad grafom sú umiestnené ochranné indikačné prvky, v prípade poruchy zmenia farbu na červeno a program sa automaticky stopne, v opačnom prípade by mohlo dôjsť k poškodeniu vibračného valca.

Po skončení testu je možné prehliadnuť si výsledky testu aj z ďalších akcelerometrov, teda samotný *post processing* (Obrázok 35).



Obrázok 35: Predný panel – spracovanie

Aby sa ušetrilo miesto, bolo zvolené zobrazenie do jedného grafu, takže v grafe rýchlosti sa zobrazia údaje zo všetkých troch akcelerometrov naraz. Podobná situácia nastáva aj pri ďalších dvoch grafoch. Vedľa každého grafu sa nachádza tlačidlo na export údajov do programu Microsoft Excel, ktorý bol zvolený z toho dôvodu, že je možné ho považovať za najpoužívanejší tabuľkový editor.

Graf rýchlosti nám jasne ukazuje, kde došlo k rezonančnej frekvencii, ktorú reprezentuje maximálna rýchlosť okolo určitej frekvencie. Výpočet rýchlosti sa riadi na základe nameraných údajov zrýchlenia podľa vzťahu:

$$v(t) = \int a(t)dt \quad (5.4)$$

Obdobne boli získané aj údaje o posunutí, a to aplikovaním dvojného integrálu zrýchlenia dostávame posunutie v čase. Samozrejme, je možné použiť aj jednoduchý integrál rýchlosti pre získanie posunutia. V tomto prípade bola použitá rovnica:

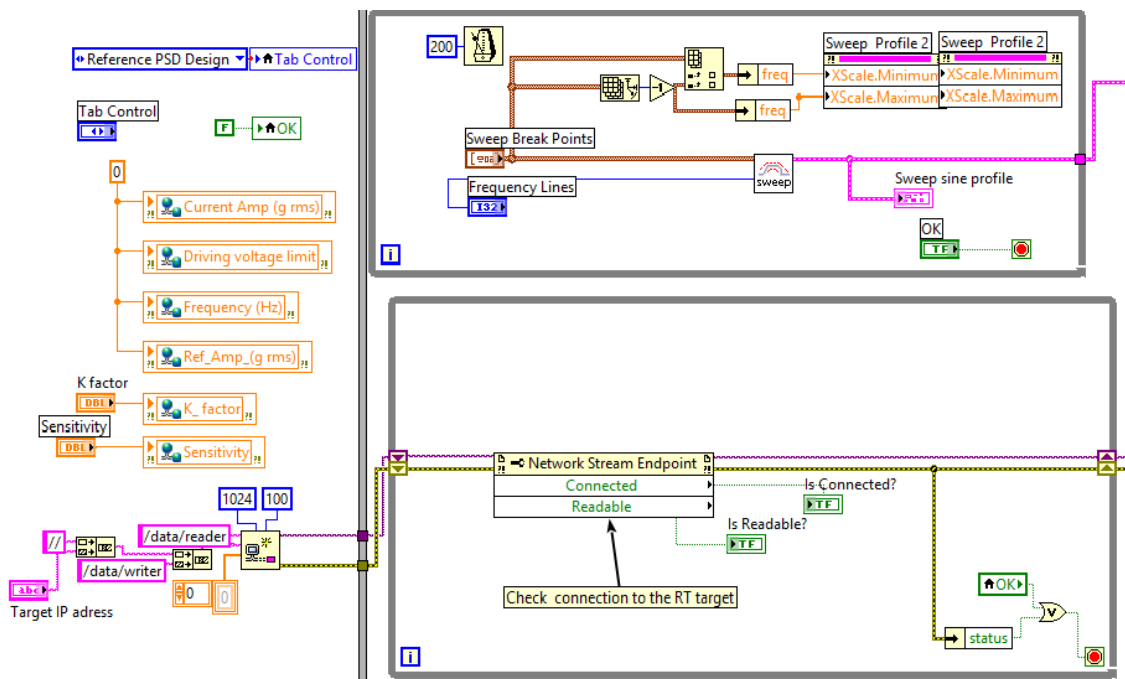
$$x(t) = \iint a(t) dt \quad (5.5)$$

V poslednom grafe je rozloženie výkonu na jednotlivé spektrálne zložky. Všetky popísané grafy prezentujú funkcie frekvencie, teda jasne môžeme napr. graf rýchlosti využiť na diagnostikovanie v prípade problému.

4.3.3 Main (host-pc).vi – blokový diagram

V predchádzajúcej kapitole bol predstavený predný panel, teda veľmi jednoducho povedané „to čo vidíme“. Prejdime teraz k tomu prečo a ako bol navrhnutý program a čo všetko sa skrýva „vzadu“.

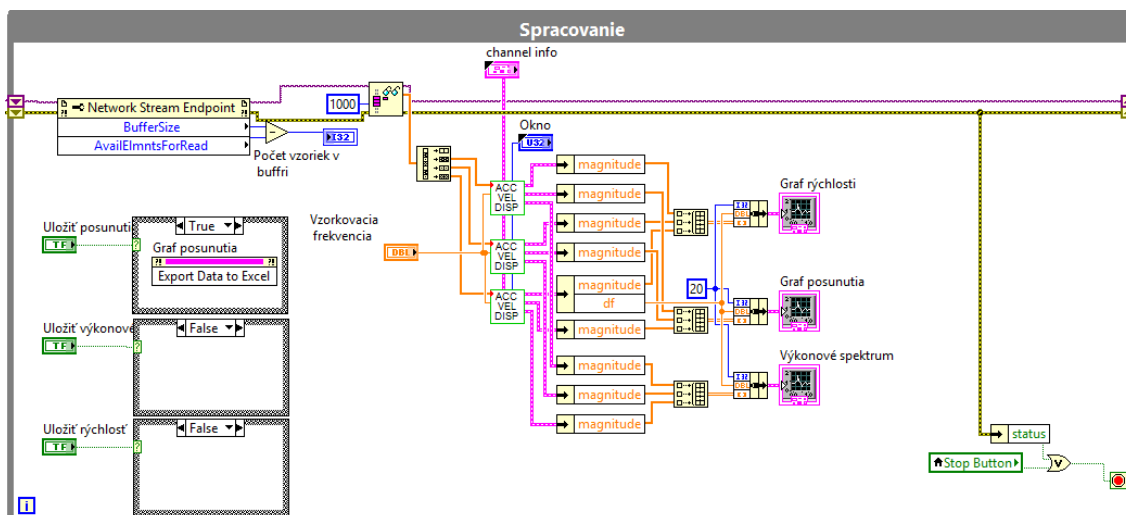
Pretože blokový diagram je rozsiahly, uvedieme najdôležitejšie časti a v prípade záujmu si čitateľ môže blokový diagram prehliadnuť priamo v programe. V základe je program rozdelený na predspracovanie, teda výpočet profilu podľa zadaných parametrov a súčasne nadviazanie komunikácie. Druhá časť je samotné generovanie sínusového signálu s postupne sa zvyšujúcou frekvenciou – v literatúre sa môžeme stretnúť s pojmom „chirp“ signál. Samotné spracovanie, ktoré sa vykonáva súčasne s generovaním sínusového signálu.



Obrázok 36: Blokový diagram – inicializácia, sweep patern a kontrola spojenia

Ako bolo spomínané vyššie, pri využívaní zdieľaných premenných (*share variable*) sa odporúča zapísať prvotné hodnoty, aby sme sa vyhli nežiaducim a neočakávaným stavom. V ľavej časti obrázka si teda inicializujeme premenné, ktoré budeme používať a zapíšeme do nich preddefinovanú hodnotu, teda 0. Prípadeň môžeme zapísať priamo hodnoty, ktoré od nich budeme požadovať vo väčšine prípadov. V spodnej ľavej časti, sa nachádza už len inicializácia komunikácie cez prenos dát sieťou (*Network Stream*), zadefinujeme si názov príjemcu, vysielacza a, samozrejme, IP adresu.

Vo vrchnej časti sa nachádza samotné prepočítavanie profilu, pre generovanie sínusového signálu a úprava hodnôt grafu, na ktorom sa zobrazuje vytvorený profil. Návrh generovania sine sweep signálu bol prevzatý z pôvodného návrhu, ktorý bol využitý ako predloha. V jednoduchosti môžeme povedať, že sa vytvorí cluster, ktorý obsahuje dve jednorozmerné polia, s previazanými hodnotami amplitúdy a frekvencie, samotné rozlíšenie a presnosť sú priamo závislé od počtu spektrálnych čiar.



Obrázok 38: Blokový diagram – spracovanie

O samotný prepočet zrýchlení na rýchlosť, posunutie a výpočet výkonového spektra sa postará samostatné SubVI, ktorému sa budeme ešte venovať. V rámci cyklu spracovania je z prenosu dát sieťou (*Network Stream*), ktorý sme vytvorili pri spustení vybratých 1024 vzoriek, konkrétne vyberáme vzorky od meracích akcelerometrov. Hodnoty riadiaceho akcelerometra nespracovávame, v prípade potreby je možné si toto spracovanie doplniť, rovnako ako je zobrazené na Obrázok 38.

Vďaka využitiu prenosu dát sieťou (*network stream*) nedochádza k strate informácie a zároveň je prenos ošetrený *bufferom*, takže v prípade nedostatočnej rýchlosti spracovania sú informácie uchované a budú spracované. V ľavej časti sa nachádza export dát z grafu priamo do programu Microsoft Excel, ktorý je realizovaný pomocou *Invoke Method*.

4.3.4 Spracovanie údajov

Vyššie spomenuté spracovanie údajov, o ktoré sa stará samotné SubVI, môžeme vidieť na Obrázok 39.



Po prepočítaní vstupných údajov na zrýchlenie, spočítame výkonové spektrum signálu, z ktorého následne postupnou buď jednou, alebo dvojitou integráciou získame rýchlosť a posunutie. Výpočet rýchlosti a posunutia sa riadi rovnicou (5.4), resp. (5.5), výkonové spektrum $S_{xx}(f)$ ako funkcia $x(t)$ definujeme ako

kde $X(f) = F\{x(t)\}$ a $X^*(f)$ je komplexne združené k $X(f)$.

56

$$S_{xx} = \frac{\|F\{X\}\|^2}{n^2} \quad (5.7)$$

kde S_{xx} reprezentuje výstupnú sekvenciu výkonového spektra, pozostávajúceho z n vzoriek.

Ako takmer každé *SubVI*, aj toto je vsadené do takzvanej chybovej podmienky, teda v prípade, že v programe nastane chyba, predtým ako zavoláme tento podprogram, chyba sa preniesie až na koniec a podprogram nebude realizovaný.

4.3.5 Manuál pre obsluhu

V krátkosti uved'me parametre, na ktoré je treba dať pozor, pri používaní programu:

Hustota frekvenčných čiar – musí byť vždy aspoň 2× viac ako je maximálna frekvencia. Udáva hustotu spektra. Neodporúča sa zadávať viac ako 3-násobok maximálnej frekvencie.

Citlivosť – citlivosť kontrolného akcelerometra, údaj udáva výrobca v [mV/g].

Maximálne riadiace napätie – maximálne možné napätie na výstupe. Strojovo obmedzené na 3 V, aby nedošlo k poškodeniu vibračnej stoličky.

Maximálna úroveň vibrácií – ďalšia ochrana, aby nedošlo k poškodeniu vibračnej stoličky. Udáva výrobca, pre náš prípad max. 2 g, inak môže dôjsť k poškodeniu zariadenia.

Referenčná úroveň – podľa zadaného profilu sa podľa referenčnej úrovne určia limity, teda profil + referencia = horný limit a profil – referencia = spodný limit.

Doba slučky – udáva, ako rýchlo sa bude meniť frekvencia sínusu. Udáva sa v milisekundách. Odporúčaná doba je od 50 ms. Defaultná hodnota je nastavená na 100 ms.

Kc, Ti, Td – konštanty pre PID regulátor, v základnom nastavení sú nastavené na:

Kc – 0,25

Ti – 0,024

$T_d - 0,001$

Tieto hodnoty sú stabilné, v prípade zmeny a optimalizácie sa odporúča nasledujúci postup hľadania nových parametrov regulátora:

1. $D = 0$, $I = \max$, P zvyšovať až nastanú trvalé kmity
2. Nastaviť $P = P / 2$
3. I znižovať až nastanú trvalé kmity
4. Nastaviť $I = I * 2$
5. D zvyšovať až nastanú trvalé kmity
6. Nastaviť $D = D / 2$

Ide o experimentálne nastavovanie.

Pred spustením, je potrebné vždy nastaviť profil, referenčnú úroveň a maximálnu úroveň vibrácií. Maximálna úroveň napätia je obmedzená programovo na 3 V. Závisí rovnako od možností použitého modulu. Test spustíme tlačidlom START a následne program pracuje sám. Po dokončení testu prebehne spracovanie posledných údajov z ostatných akcelerometrov a samotné meranie sa vypne. V prípade poruchy okamžite stlačiť stop tlačidlo na prednom paneli. V prípade poruchy komunikácie, odporúčame program reštartovať.

ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo vytvorenie riadiaceho a záznamového programu v prostredí LabVIEW na platforme CompactRIO a overenie funkčnosti programu na malej vibračnej stolici.

Keďže sa jedná o oblasť nie príliš známu, je na začiatku urobený úvod do problematiky vibračných testov, cez ktoré by mala prejsť každá elektronická súčiastka či zariadenie.

Boli rozobraté metódy riadenia vibračných zariadení, ktoré sa používajú v praxi. Predstavené boli rovnako najpoužívanejšie testy u vibračných skúšok, pričom tri najhlavnejšie boli rozobraté podrobnejšie.

V praktickej časti práce boli predvedené dve pracoviská, na ktorých sa počas príprav tejto práce pracovalo a nakoniec obe regulačné algoritmy využívajú rovnaký princíp regulácie, a to PID.

Predložené boli aj iné varianty vrátane vlastných návrhov, ktoré však nepostačovali z praktického hľadiska potrebám riešenia.

Výsledkom práce sú teda dve pracoviská, a to optimalizovaný proces spájkovania v inertnej atmosfére a pracovisko pre vibračné testy rozmetaným sínusom, ktoré nájde využitie hlavne pri hľadaní rezonančných frekvencií a testoch životnosti.

Podarilo sa implementovať riadenie a záznam, takže je možné plnohodnotne spracovávať namerané údaje.

Vibračným skúškam v mikroelektronike či elektronike sa venuje pomerne málo vedeckých článkov, považujem prácu za otvorenie nových možností, ktoré výsledné pracovisko ponúka.

Pokračovaním práce by určite malo byť rozšírenie možností súčasného riešenia, ale hlavne pridanie ďalších testov ako náhodné vibrácie, šokové testy či ďalšie kombinácie.

LITERATÚRA

- [1] Vibration [online]. Wikipedia – [cit. 26. května 2014]. Dostupné na [www: http://www.en.wikipedia.org/wiki/Vibration](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Vibration)
- [2] Displacement (vector) [online]. Wikipedia – [cit. 26. května 2014]. Dostupné na [www: http://www.en.wikipedia.org/wiki/displacement\(vector\)](http://www.en.wikipedia.org/wiki/displacement(vector))
- [3] What is difference between free and forced vibration [Online]. – [cit. 26. května 2014] . Dostupné na [www: http://www.indiastudychannel.com/experts/31102](http://www.indiastudychannel.com/experts/31102)
- [4] STEINBERG, S. D.: Avoiding Vibration in Odd-Shaped Printed-Circuit Boards. In *Westlake Village, CA 91361*
- [5] STEINBERG, S. D.: Designing Electronics for High Vibration and Shock. In *Westlake Village CA 91361*
- [6] PEREZ, M., KEFEE, M., COLFAX, R., VETER, S., MURRY, D., SMITH, J., KLEINE, D., AMICK, P.: Vibration Testing of Repaired Lead-Tin/Lead-Free Solder Joints. In *Electronic Components and Technology Conference 2006*
- [7] TOSHIYUKI, H., YOSHITAKA, U., TAKESHI, N., KOZO, F.: Destruction mechanism resulting from vibration load in pcb-mounted electronics. In *ESPEC Technology Report No.17*
- [8] AYTEKIN, B: *Vibration Analysis of PCBs and electronic components*. Master Thesis. Middle East Technical University 2008
- [9] Measuring Vibration [online]. Bruel & Kjaer – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: <http://www.bksv.com/doc/br0094.pdf>
- [10] Beginner's Guide to Machine Vibration [online]. – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: http://www.reliabilityweb.com/forms/beginners_guide_vibration.pdf
- [11] Akcelerometer [online]. Wikipedia – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: <http://en.wikipedia.org/wiki/Accelerometer>

- [12] Akcelerometre [online]. Senzorika – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/175>
- [13] Vibračný zkoušení [online]. Bruel – [cit. 12. ledna 2014]. Dostupné online: http://www.bruel.sk/PDF_files/Vibracni_zkouseni.pdf
- [14] National Instruments – manuals [online]. National Instrument – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: <http://www.ni.com>
- [15] Vibration control [online]. M+P International – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: <http://www.mpihome.com/files/pdf/vcintro.pdf>
- [16] PREUMONT, A.: Active vibration control. In *Universit'e Libre de Bruxelles*, Brussels.
- [17] Metoda nejmenších čtverců [online]. Wikipedia – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: http://cs.wikipedia.org/wiki/Metoda_nejmen%C5%A1%C3%ADch_%C4%8Dtverc%C5%AF
- [18] Least mean square filter [online]. Wikipedia – [cit. 26. května 2014]. Dostupné online: http://en.wikipedia.org/wiki/Least_mean_squares_filter
- [19] HAYKIN, S.: Adaptive Filter Theory, Fourth Edition, *Prentice Hall, Upper Saddle River*, N.J., 2002
- [20] MULLINS, S., HENEGHAN, C.: Alternative Least Mean Square Adaptive Filter Architectures for Implementation on FPGA, *Digital Signal Processing Group*, Department of Electronic and Electrical Engineering, University College Dublin.
- [21] SZOPOS, E., HEDESIU, H.: Labview FPGA based noise canceling using the LMS adaptive algorithm, *Bases of Electronics Department*, Technical University of Cluj-Napoca, Romania.
- [22] DVOŘÁČEK, M.: *Estimátor v systému regulace s proměnlivou strukturou*. Diplomová práce. Brno: VUT FEKT, 2008. 73 s.
- [23] IPC-Association Connecting Electronics Industries: IPC-TM-650 Test methods Manual: 2.6.9 Vibration, Rigid Printed Wiring, Revision B, 2004. Dostupné na www: <http://www.ipc.org>

- [24] ReliaSoft Corporation, Accelerated Life Testing Reference, Tucson, AZ: ReliaSoft Publishing, 2007. Dostupné na [www: http://www.weibull.com/hotwire/issue116/hottopics116.htm](http://www.weibull.com/hotwire/issue116/hottopics116.htm)
- [25] BAREN, J.: *What is random vibration testing?* [Online]. Vibration Research Corporation, Jenison, Michigan – [cit. 26. května 2014] Dostupné na [www: http://www.sandv.com/downloads/1202vanb.pdf](http://www.sandv.com/downloads/1202vanb.pdf)
- [26] ZHUGE, J.: Digital Shaker Vibration Controller a Historical View, *Crystal Instruments, August, 2010*
- [27] SAUTHER, E.: Sine Sweep Vibration Testing for Modal Response Primer, *Department of Optical Sciences, University of Arizona Opto-Mechanical Engineering, USA.*
- [28] GENČANSKÝ, D.: *Measurement workplace for soldering process in LabVIEW*, EEICT 2014 vol. 2, s. 105 – 107
- [29] GENČANSKÝ, D.: *Vytvoření měřícího pracoviště v prostředí LabVIEW*. Brno: VUT FEKT, 2014. 20 s.
- [30] MIHÁLIK, J., ZAVACKÝ, J.: *Diskrétní signály a systémy*, TUKE FEI Košice, ISBN 978-80-8073-774-0
- [31] PAGE, M.: Signal processing for vibration control. In *DSP in Instrumentation, IEE Colloquium on* (Digest No.009), 1992.

ZOZNAM SYMBOLOV, VELIČÍN A SKRATIEK

<i>SubVI</i>	Podprogram v prostredí LabVIEW
<i>f</i>	Signál v časovej oblasti oblasti
<i>F</i>	Signál vo frekvenčnej oblasti
<i>g</i>	jednotka zrýchlenia
<i>P</i>	proporcionálna zložka PID regulátora
<i>I</i>	integračná zložka PID regulátora
<i>D</i>	derivačná zložka PID regulátora
<i>FXP</i>	dátový typ vyjadrujúci číslo s pevnou desatinnou čiarkou (<i>Fixed Point</i>)
$v(s)$	vektor rýchlosti
$a(s)$	vektor zrýchlenia
$x(s)$	vektor posunutia

ZOZNAM PRÍLOH

1. CD s programom.